



Escuela de Caminos

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL
CERRAMIENTO DE JUNTAS
HORIZONTALES ENTRE PANELES DE
MUROS DE SUELO REFORZADO.**

Trabajo realizado por:
Joan Manuel Lozano Santos

Dirigido por:
Antonio Lloret
Ivan Puig Damians

Máster en:
Ingeniería del terreno.

Barcelona, 30 de septiembre del 2019.

Departamento de ingeniería civil y ambiental.

TRABAJO FINAL DE MÀSTER

Resumen.

El uso de muros de suelos reforzados se ha expandido a nivel mundial contribuyendo múltiples resoluciones constructivas y al mismo tiempo optimizando el rendimiento de sus componentes. Estas estructuras se caracterizan por las diversas patologías que presentan en estado de servicio debido a las interacciones complejas que se generan entre los elementos estructurales y el suelo de relleno, donde la interacción entre la fachada del muro y el suelo de relleno se caracterizan por controlar el estado de carga de los elementos estructurales.

Para mejorar la interpretación del estado bajo carga de los muros de suelo reforzado, en este trabajo de investigación se realiza un estudio experimental del cerramiento de las juntas horizontales (compresión de los apoyos) sobre un muro de suelo reforzado. Se describe el proceso seguido, las herramientas y el software utilizados para la toma del cierre de las juntas horizontales. Para esto, se han realizado una serie de medidas in-situ, en las cuales se muestran los resultados del cierre y se obtiene una tendencia con el objetivo de determinar la fuerza vertical que transmite el paramento a la junta horizontal, estas fuerzas se determinan en base a los parámetros de resistencia del apoyo, utilizando los resultados de ensayos a compresión de los mismos, mostrando así, la relación entre las fuerzas verticales que actúan sobre la junta horizontal y el peso propio del panel (factor de carga vertical) en función de la profundidad de las juntas horizontales.

Las fuerzas obtenidas a partir de las medidas instrumentadas son contrastadas con los modelos numéricos realizados en esta investigación, el modelo representa una sección del muro de estudio de 12 metros de altura, donde las propiedades del refuerzo, paramentos y apoyos son los mismos que los utilizados en la obra. Se propusieron valores distintos de la interfaz entre el suelo de relleno y el paramento, superiores a los valores típicos del ángulo de rozamiento hormigón-suelo, al igual que distintos valores de rigidez y ángulo de fricción del suelo de relleno. Luego se examina la influencia de la rigidez asumida del material menos compactado y el ancho de la losa de nivelación. Se muestran los resultados y la influencia de cada una de estas variaciones, y se toma como válido el modelo numérico que mejor se ajusta a las fuerzas obtenidas de las medidas instrumentadas. Finalmente se comparan los parámetros del suelo de relleno y del sustrato del modelo final y los obtenidos del ensayo de laboratorio del suelo utilizado en la obra de estudio.

.

Abstract.

The use of soil reinforced retaining walls has expanded worldwide contributing multiple constructive solutions and optimizing the performance of its components. These structures are defined by diverse pathologies that they present in a state of service due to the complex interactions that are generated between the structural elements and the ground. Where the interaction between the face of the wall and the soil reinforcement is characterized by controlling the state of loads in the structural elements.

In order to improve the interpretation of the state under loads of the soil reinforced retaining walls, in this research, an experimental study of the closing on the horizontal joints (compression of the bearing pads) on a reinforced wall is developed.

The process is described, followed by the tools and software that were used to take the closure of the horizontal joints. For this, a series of measurements were taken on-site, in which the results of the closure are shown, and a tendency is obtained in order to determine the vertical force that the concrete panel transmits to the horizontal joint, these forces are determined based on the parameters of resistance of the bearing pad, using the results of the compression in the tests. Therefore, the relationship between the vertical force acting on the horizontal joint and the concrete panel's self-weight (vertical load factor) as a function of the depth of the horizontal joints.

The forces obtained from the instrumented measures are contrasted with the numerical model carried out on this investigation, where the model represents a section of the study wall of 12 meters height, where the properties of the reinforcement, the concrete panels, and the bearing pads are the same as the used on-site.

Different values of the interface between the reinforced soil and the concrete panel were proposed, which are higher than the typical concrete-soil friction angle values, as well as different values of stiffness and friction angle of this reinforced soil. The influence of the assumed stiffness of the less compacted material and the width of the leveling slab is then examined. The results and the influence of each of these variations are shown, and the numerical model that best fits the forces obtained from the instrumented measures is taken as valid. To conclude, the parameters of the reinforced soil and the substrate of the final model are compared with those obtained from the laboratory test of the soil used in the study.

Índice

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.	1
1.2 Objetivos.	2
1.3 Metodología del trabajo de investigación.	2
Capítulo 2: Muros de suelo reforzado.....	3
2.1 Introducción.	3
2.2 Concepto de suelo reforzado.	3
2.3 Componentes del muro de suelo reforzado.	5
2.4 Principios del diseño en muros de suelo reforzado.	10
2.5 Patología en servicio.	13
2.5.1 Asientos relativos.	13
Capítulo 3: Muro de estudio.	15
3.1 Introducción.	15
3.2 Descripción del muro.	15
3.2.1 Ubicación.....	15
3.2.2 Suelos.	16
3.2.2.1 Sustrato.	16
3.2.2.2 Relleno.....	17
3.2.3 Refuerzos.....	18
3.2.4 Paramento.....	19
3.2.5 Profundidad de empotramiento.	19
3.2.6 Apoyos.....	19
3.3 Cerramiento de la junta horizontal.	21
3.3.1 Metodología.	21
3.3.2 Medidas directas in-situ.	22
3.3.3 Medidas mediante software imageJ.	23
3.4 Resultado de medidas del cerramiento.	25
3.4.1 Corrección por giro entre panel.	27
3.4.2 Resultado de medidas corregidas.	30
3.4.3 Fuerzas sobre los apoyos.....	30
Capítulo 4: Modelo Numérico.	34
4.1 Introducción.	34
4.2 Propiedades de los materiales e interfaces.	36
4.3 Resultados.	39

4.3.1	Ajuste del modelo.	39
4.3.2	Influencia de la rigidez asumida en el suelo menos compactado.	42
4.3.3	Influencia del ancho de la losa de nivelación.	43
4.3.4	Fuerzas verticales sobre las juntas horizontales.	44
	Capítulo 5: Conclusiones y futuras líneas de investigación.	46
	Bibliografías.	48
	Anexos :Tablas y gráficas del cierre en las juntas horizontales.	50

Índice de figuras.

Figura 2.1.- Comportamiento tensión - deformación de arena para distintas presiones de confinamiento. (Puig Damians, 2016).....	4
Figura 2.2.- Muestras de suelo reforzado bajo carga (a) y no reforzado bajo carga (b). (Puig Damians, 2016)	4
Figura 2.3.- Criterio de falla de Mohr-Coulomb en caso de refuerzo del suelo (Puig Damians, 2016)	4
Figura 2.4.- Tipos de paramentos.....	5
Figura 2.5.- Colocación de panel (paramento) ligera pendiente hacia el interior del relleno (Berg, Christopher, & Samta, 2009).....	6
Figura 2.6.- Tipos de Refuerzos. A) Tiras metálicas, B) Malla metálica C) Tiras Poliméricas, D) Geomalla	7
Figura 2.7.- Colocación de apoyos material EPDM (Berg, Christopher, & Samta, 2009).	9
Figura 2.8.- Tipos y formas de apoyos, a) Etileno propileno dieno monómero (EPDM) y polietileno de alta densidad (HDPE).	9
Figura 2.9.- Sección transversal de un muro de suelo reforzado. ubicación de la solera de nivelación, profundidad de empotramiento (D) y suelo de relleno.	10
Figura 2.10.- Estabilidad externa del muro, distintos tipos de falla, (Jara Mori, 2010)	11
Figura 2.11.- Ubicación de las cargas máximas de tracción (Tmax) con respecto a la extensibilidad del refuerzo (a) y las cargas que actúan en refuerzos: concepto de longitud de resistencia (b).	12
Figura 2.12.- Aplastamiento de almohadillas de apoyo, fragmentación del paramento, (Neely & Tan, 2010).	14
Figura 2.13.- Contribución de fuerzas verticales en el paramento (Puig Damians, 2016).....	14
Figura 3.1.- Ubicación de obra en estudio.	15
Figura 3.2 Información geológica de la zona del suelo en que se encuentra la obra ,(Instituto Cartográfico y geográfico de Catalunya ICGC).....	16
Figura 3.3.- Detalle del refuerzo tipo malla de acero (escalera de acero)	18
Figura 3.4.- Detalle, sección transversal, longitud y separación vertical para distintas alturas de muro.	18
Figura 3.5.- Panel rectangulares utilizados en la obra.....	19
Figura 3.6.- Apoyo tipo gofre, material polietileno de alta densidad (HDPE).....	19
Figura 3.7.- Comportamiento a compresión, apoyo tipo gofre, material polietileno de alta densidad (HDPE), A) Gráfico fuerza- desplazamiento B) Gráfico presión deformación (VSL, 2008)	20
Figura 3.8.- Alzado Muro 4 esquema de división de secciones a lo largo del muro.....	22

Figura 3.9.- Medida del cierre de la junta horizontal en el lateral derecho del panel utilizando calibre o pie de rey.	22
Figura 3.10.- Gráfico de representación del cierre promedio medido en función de la profundidad de la sección No.1.	23
Figura 3.11.- Escala de referencia lateral izquierdo del paramento. Software ImageJ.	23
Figura 3.12.- Medida de las juntas horizontales en base a escala de referencia en el lado izquierdo del panel, Software ImageJ.	24
Figura 3.13.- Ejemplo promedio de medidas de acuerdo a la escala de referencia.....	25
Figura 3.14.- Gráfico del cierre de juntas horizontales para secciones agrupadas por rangos de alturas de muro.	26
Figura 3.15.- Gráfico del cierre promedio de las juntas en función de la profundidad para las secciones agrupadas por rangos de alturas de muro.	26
Figura 3.16.- Desplazamientos relativos entre panel, observados en obra de estudio. Señal amarilla desplazamiento hacia el interior del relleno, señal roja desplazamiento hacia el exterior del relleno.	27
Figura 3.17.- Efecto de los desplazamientos relativos(giro) entre panel y cierre de la junta horizontal.....	28
Figura 3.18.- Curva empírica para estimar el desplazamiento lateral durante la construcción del muro. (AASHTO, 2012).....	28
Figura 3.19.- Tabla de distribución de desplazamientos relativos entre panel y cierre de la junta.	29
Figura 3.20.- Gráfico del ajuste del cierre promedio debido a los desplazamientos impuestos a los paneles de acuerdo a la alturas de muro.	30
Figura 3.21.- Influencia del aumento de área en apoyos	31
Figura 3.22.- Comportamiento a compresión, con dos apoyo tipo gofre, material polietileno de alta densidad (HDPE) (VSL,2008).....	31
Figura 3.23.- Comportamiento a compresión de dos apoyos HDPE tipo gofre, pendiente del comportamiento triliteral, (VSL.2008).....	32
Figura 3.24.- Resultados de fuerzas actuante sobre los apoyos en función de la profundidad. ..	33
Figura 3.25.- Factor de carga vertical en función de la profundidad.	33
Figura 4.1.- Mallado y dimensiones del modelo numérico 2D	35
Figura 4.2.- Implementación de las Interfaces en el modelo.....	39
Figura 4.3.- Fuerza vertical sobre las juntas horizontales en función de la altura del muro para distintos ángulos de fricción interna del material de relleno, asumiendo una interfaz relleno-paramento $R=0.6$	40
Figura 4.4.- Fuerza vertical sobre las juntas horizontales en función de la altura del muro para distintos ángulos de fricción interna del material de relleno, asumiendo una interfaz relleno-paramento $R=0.8$	41
Figura 4.5.- Fuerza vertical sobre las juntas horizontales en función de la altura del muro para distintos ángulos de fricción interna del material de relleno, asumiendo una interfaz suelo-paramento $R_{inter}=0.85$	41
Figura 4.6.- Fuerza vertical sobre las juntas horizontales en comparación con los resultados de las medidas instrumentadas.	42
Figura 4.7.- Influencia de la reducción asumida en la rigidez para la columna de suelo menos compactada sobre la fuerza vertical en las juntas horizontales.	43
Figura 4.8.- Influencia del ancho de la losa de nivelación sobre las fuerzas verticales en las juntas horizontales.....	43
Figura 4.9.- Resultado del modelo final ,fuerzas verticales sobre las juntas horizontales en función de la de la profundidad de la junta.	44

Figura 4.10.-Factor de carga vertical en las juntas horizontales en función de la altura del muro.	44
Figura 4.11.-Perfil vertical del muro al final de la construcción de acuerdo al modelo.	45

Índice de tablas

Tabla 2.1.-Características suelo de relleno. (AASHTO, 2012)	8
Tabla 3.1.-Propiedades físicas del suelo de fundación	16
Tabla 3.2.-Propiedades resistentes del suelo de fundación	17
Tabla 3.3.-Modulo de Young a partir de correlaciones del SPT	17
Tabla 3.4.-Ensayos de compactación a dos muestras del suelo de fundación	17
Tabla 3.5.-Resultados desplazamientos laterales máximos a partir de curva empírica.	29
Tabla 4.1.-Propiedades del Apoyo (HDPE) y panel utilizados en modelo	36
Tabla 4.2.-Propiedades del refuerzo.	37
Tabla 4.3.-Propiedades del suelo de relleno.	38

Capítulo 1: Introducción.

1.1 Antecedentes.

La aparición de las técnicas conocidas como muros de suelo reforzado o MSE por su sigla en inglés, de “Mechanically Stabilized Earth” o TEM, por “Tierra Estabilizada Mecánicamente”, se remonta en los años 60 a partir del ingeniero Francés Henry Vidal quien presentó la patente de “Terre Armée” (Vidal, 1966) , se utilizó por primera vez en Francia en 1968 como una alternativa técnica y económica a la solución tradicional de muro gravitacionales de contención de hormigón armado. Desde entonces esta técnica se ha expandido a nivel mundial contribuyendo múltiples resoluciones constructivas, mejorando y optimizando el rendimiento de sus componentes y creciendo en su aplicabilidad frente otras opciones estructurales (Anderson et al., 2006), (Valero, R.F., 2002). Estas estructuras han sido ampliamente empleadas durante el último medio siglo para la construcción de carreteras, autopistas, estribos de puentes y líneas férreas.

Se conoce como muro mecánicamente estabilizado a la combinación de material de relleno compactado con propiedades ideales y un refuerzo colocado entre la masa de suelo. El método de construcción consiste en la colocación progresiva del paramento (constituido por unidades de panel de hormigón) a medida que avanza los niveles del suelo de relleno compactado, los paneles están separados en el eje vertical mediante apoyos poliméricos, se instalan refuerzos a una separación regular vertical y horizontal los cuales se fijan a la parte posterior del paramento utilizando un par de pestañas de conexión de acero. En esta técnica de construcción, el material compactado detrás del paramento es un componente estructural importante. El proceso de construcción de la tierra armada hace que los estados en servicios tengan patologías variadas ya que es un proceso muy metódico en el cual cada capa de tierra compactada debe cumplir con las especificaciones técnicas del proyecto y la correcta verticalidad de cada paramento.

El comportamiento de los muros de suelo reforzado es complejo debido a las interacciones entre el relleno de suelo compactado, los elementos estructurales que lo componen y el mismo proceso constructivo, dando lugar a patologías diversas en estado de servicio. Diferentes autores estudiaron las interacciones de los distintos componentes mediante instrumentaciones a estructuras de suelo reforzado para diferentes alturas de muro, geometrías del paramento y tipos de refuerzo (Bastick et al., 1993), (Christopher et al., 1994), (Runser, 1999), (Runser et al., 2001). La incorporación de los modelos numéricos mejoran la interpretación de la patologías en estado de servicio, se han desarrollado modelos numericos validados por las medidas de los muros instrumentados, para llenar los vacios que existen en las medidas físicas reportadas para poder realizar un análisis de sensibilidad según diferentes tipos de geometrías de paramento, condiciones de contorno, parámetros de los materiales y distintos modelos constitutivos.

1.2 Objetivos.

Estudio experimental del cerramiento de las juntas horizontales entre paneles de muro de suelo reforzado, realizando una serie de medidas y definiendo una tendencia del cerramiento de cada junta horizontal en función de la profundidad (medido desde la corona del muro).

Determinar la fuerza axial total que actúan sobre las juntas horizontales en función de la profundidad.

Obtener la variación del factor de carga axial (relación entre la carga axial actuante y el peso propio de la columna del paramento).

Realizar una comparación entre la fuerza axial que actúa en las juntas horizontales obtenidas mediante un modelo numérico de diferencia finitas (PLAXIS 2D) y las fuerzas determinadas en base a las medidas instrumentadas en obras.

1.3 Metodología del trabajo de investigación.

El trabajo de investigación está estructurado por 5 capítulos los cuales se describen a continuación:

Capítulo 2, Muro de suelo reforzado, se hace una introducción general sobre el concepto del mecanismo de trabajo de los suelos reforzados, al igual que una descripción de los distintos tipos de materiales de los componentes que posee el mismo, se comentan los principios del diseño y la problemática de las diversas patologías de servicio en este tipo de estructura

Capítulo 3, Muro de estudio, se describen las propiedades físicas y dimensiones de los componentes utilizados en obra, al igual que la ubicación de la misma. Se narra el proceso y las herramientas utilizadas para la toma de medidas del cierre de la junta y se muestran los resultados de las fuerzas que actúan sobre las juntas horizontales.

Capítulo 4, Modelo numérico, se realiza un modelo numérico que representa una sección del muro de estudio, se describe de manera detallada las propiedades, dimensiones e interfaces utilizadas en el modelo, se muestran los resultados de la fuerza vertical que actúan sobre las juntas horizontales y la influencia de la interacción suelo-estructura que presenta sobre esta.

Capítulo 5, Conclusiones y futuras línea de investigación, se exponen las conclusiones derivadas del trabajo de investigación y finalmente se proponen algunas futuras líneas de investigación.

Capítulo 2: Muros de suelo reforzado.

2.1 Introducción.

En el presente capítulo se realiza una introducción general sobre el concepto del mecanismo de trabajo de los suelos reforzados, al igual que una descripción de los distintos tipos de materiales de los componentes que posee el mismo, se comentan los principios del diseño y la problemática de las diversas patologías de servicio en este tipo de estructura.

2.2 Concepto de suelo reforzado.

Los suelos se caracterizan por poseer alta resistencia a compresión, y baja o ninguna resistencia a tracción. Un suelo reforzado consiste en la combinación de un material granular más un elemento resistente a tracción, este se coloca de forma horizontal entre capas de material granular aportando de manera directa resistencia a tracción.

El comportamiento mecánico de un material reforzado, puede deducirse mediante el comportamiento de la propia matriz del suelo, teniendo en cuenta el efecto de la dilatación de una muestra de suelo granular (Figura 2.1), al aplicar una carga sobre un suelo reforzado (Figura 2.2), se desarrolla una presión lateral y un esfuerzo de corte a través del refuerzo del suelo, diferente en caso de un suelo sin refuerzo. Debido al esfuerzo de corte, la dilatación del suelo se activa con el consiguiente aumento de la presión vertical interna por encima y por debajo de los elementos de refuerzo, generando un aumento de la resistencia (con una cohesión aparente: c').

El efecto se explica también bajo carga vertical constante, la tensión horizontal generada se reduce dentro del suelo reforzado mientras en el caso del suelo no reforzado, ocurre lo contrario ya que los elementos de refuerzo absorben parte del esfuerzo de corte lateral generado. Conformemente, como se observa mediante la representación del círculo de Mohr (Figura 2.3), asumiendo un suelo no cohesivo, se produce un aumento de volumen en el suelo debido a un incremento en el ángulo de fricción en estados de baja presión de confinamiento. De acuerdo con esto, como la presiones verticales generalmente se suponen iguales al peso propio del suelo en el diseño de estructuras mecánicamente estabilizadas (densidad del suelo por la profundidad), el coeficiente lateral real de la presión de tierra en caso de suelo reforzado con presiones de confinamiento bajas, los esfuerzos de superficie (K_r) generalmente se asumen que son más altos que en los típicos de estado activo en el sistema de muro de contención ($K_r > K_a$, es decir, $K_r / K_a > 1$). En estos casos el valor real de K_r generalmente es no lineal, con valores apropiados relacionados con los tipos de refuerzo obtenidos a partir del conocimiento empírico (Puig, 2016).

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

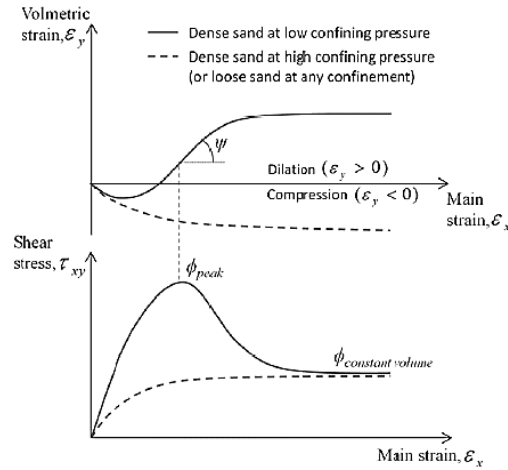


Figura 2.1.-Comportamiento tensión - deformación de arena para distintas presión de confinamiento. (Puig, 2016).

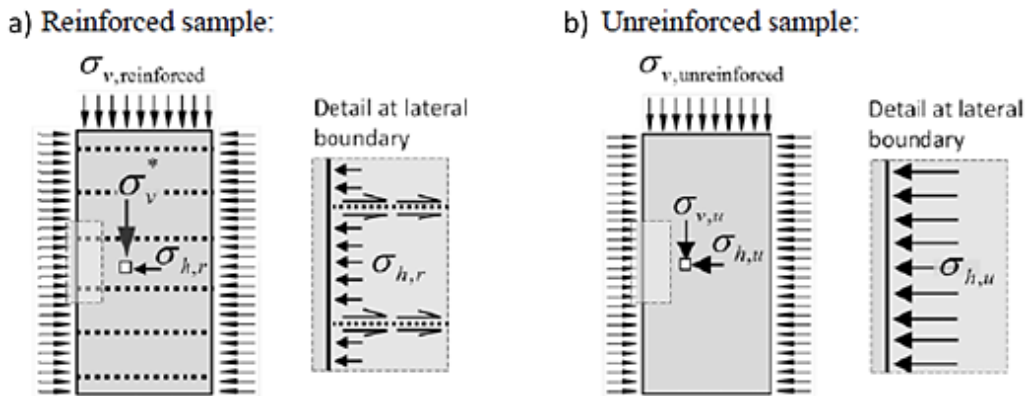


Figura 2.2.-Muestras de suelo reforzado bajo carga (a) y no reforzado bajo carga (b). (Puig, 2016).

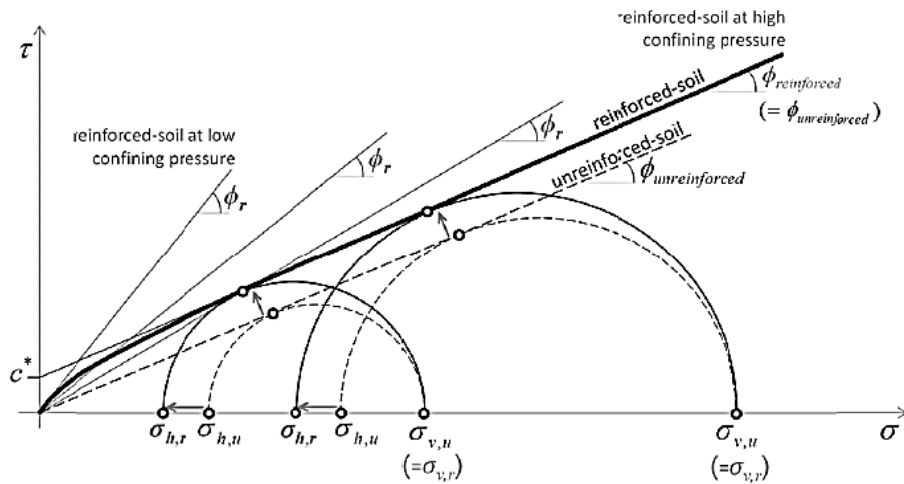


Figura 2.3.-Criterio de falla de Mohr-Coulomb en caso de refuerzo del suelo (Puig, 2016).

2.3 Componentes del muro de suelo reforzado.

Los componentes principales en un muro de suelo reforzado se describen a continuación.

Paramento: constituido por unidades de paneles de hormigón prefabricados, es la parte visible de un muro de tierra reforzada y por lo tanto el sello de identidad, se colocan de manera progresiva unos sobre el otro manteniendo una separación entre sí formando juntas verticales que cumplen el papel de dren en la estructura. Las dimensiones de los paneles pueden variar de acuerdo a cada empresa constructora, usualmente tienen proporciones cuadradas, rectangulares, hexagonales y cruciformes con un área de 2 a 5 m² y un grosor de aproximadamente 0.1 a 0.2 m (Figura 2.4). Las unidades de panel, se colocan deliberadamente hacia el interior del suelo reforzado para asegurar la alineación vertical final correcta después de la colocación del relleno como se muestra en la figura 2.5.

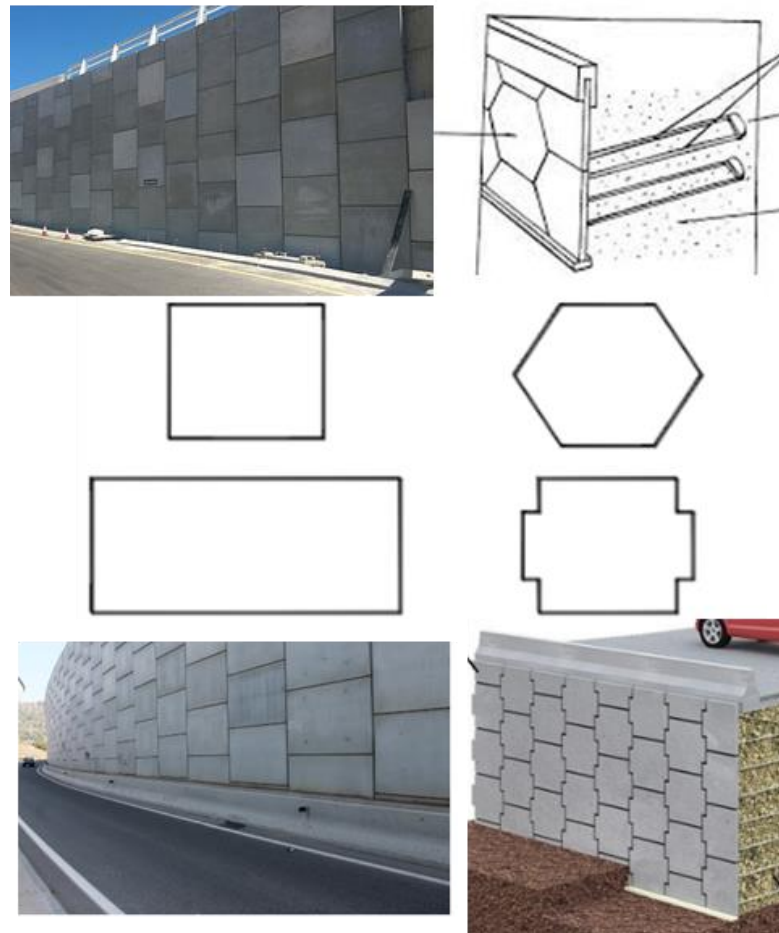


Figura 2.4.-Tipos de paramentos.



Figura 2.5.-Colocación de panel (paramento) ligera pendiente hacia el interior del suelo reforzado (Berg et al., 2009).

Refuerzos: Los refuerzos pueden considerarse rígidos o flexibles en términos de su extensibilidad contra cargas de tracción y en relación con la deformación del suelo. Los refuerzos rígidos y flexibles están compuestos por acero y polímero respectivamente, en los rígidos, la deformación en el refuerzo al fallar es mucho menor que la capacidad de deformación del suelo, sin embargo, en los refuerzos flexibles, la deformación del refuerzo al fallar es comparable o incluso mayor a la capacidad de deformación del suelo. Debido a esto, se utilizan diferentes metodologías y criterios analíticos para calcular el proyecto de construcción consecuentes de cara a la resistencia última del material de relleno y del material de tracción. Los refuerzos están sometidos a desgaste y corrosión debido al ataque químico o biológico proveniente del material de relleno es por eso que los refuerzos deben garantizar una buena resistencia a estos ataques durante la vida útil del proyecto.

La longitud mínima del refuerzo debe ser del setenta por ciento de la altura del muro, medida desde la losa de nivelación. La longitud del refuerzo se aumentará según se requiera para sobrecargas y otras cargas externas o para suelo de cimientos blandos, de lo contrario la longitud del refuerzo deberá ser uniforme en toda la altura del muro a menos que se presente evidencia justificada para indicar que la variación en la longitud es satisfactoria.

El acortamiento significativo de los elementos de refuerzo por debajo de la relación mínima recomendada de setenta por ciento de la altura del muro, se puede considerar cuando se han realizado determinaciones precisas y específicas de la resistencia del relleno no reforzado y el suelo de la cimentación.

El espacio vertical máximo entre capas de refuerzo de suelo adyacente no debe exceder los ochenta centímetros. Para las paredes que derivan cualquier parte de su capacidad de conexión por fricción, la separación vertical máxima del refuerzo debe limitarse a dos veces la profundidad del bloque (cara frontal a cara posterior) para asegurar la construcción y la estabilidad a largo plazo. La fila superior de refuerzo debe ser la mitad del espacio vertical (Berg et al., 2009).

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

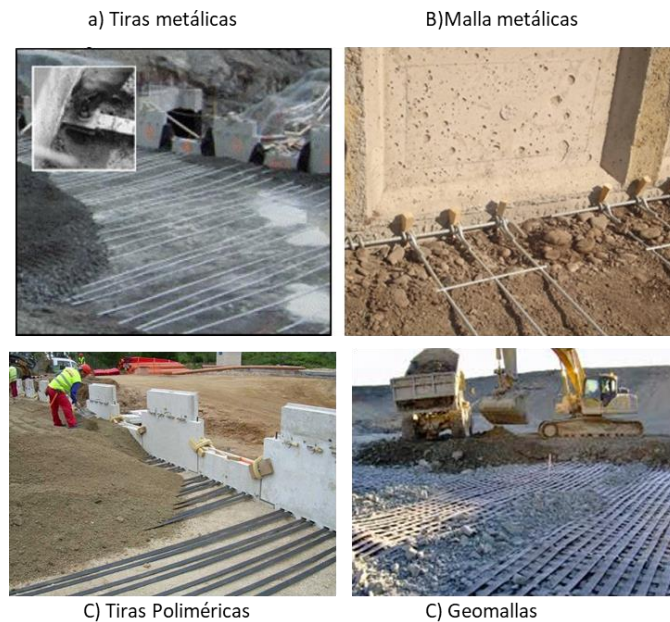


Figura 2.6.-Tipos de Refuerzos. A) Tiras metálicas, B) Malla metálica C) Tiras Poliméricas, D) Geomalla.

Suelo de relleno: El buen funcionamiento de los muros mecánicamente estabilizados están determinados por las propiedades que presente el suelo de relleno. Generalmente debe ser un material bien graduado y poseer elevado ángulo de fricción entre sus partículas para satisfacer las condiciones que aseguren durabilidad, buen drenaje y una adecuada interacción con el refuerzo, ya que los muros de suelo reforzado son sistemas que basan su funcionamiento en la interacción suelo-refuerzo.

El suelo de relleno se extiende en tongadas de entre 0.25 y 0.3 m de espesor y se compacta con el equipo adecuado, dicho relleno debe satisfacer los requisitos técnicos del proyecto que están relacionados con el tipo de refuerzo. Los requisitos técnicos principales son los siguientes: resistencia, densidad máxima, gradación del tamiz, contenido de agua óptimo, plasticidad y composición química. Estos requisitos técnicos garantizan que se desarrolle suficiente fuerza de fricción en la interacción suelo-refuerzo. Cabe destacar que el material de relleno a utilizar dependerá de la disponibilidad de canteras cercanas. Debido a la longitud del refuerzo en la estructura de suelo reforzado, el suelo de relleno se divide en dos partes: suelo reforzado y suelo retenido. Los requerimientos para el suelo de relleno, de acuerdo a las normas AASHTO 2012, se muestran en la tabla 2.1.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

Tabla 2.1.-Características suelo de relleno (AASHTO, 2012).

AASHTO		
Graduación (AASHTO T-27)	Malla (Tamaño)	Porcentaje que pasa
	4" (102 mm)	100
	Nº 40 (0.425 mm)	0-60
	Nº200 (0.075mm)	0-15
Índice de Plasticidad, PI (AASHTO T-90)	PI < 6	
Consideraciones (AASHTO T-104)	El material debe estar libre de malezas u otros componentes orgánicos de pobres propiedades mecánicas. Los materiales deben presentar bajas composiciones de magnesio y sulfatos.	

Existen otros componentes que resultan ser de gran interés en este trabajo de investigación, podrían ser estos menos importantes en términos de la estabilidad estructural, pero no menos importantes para el correcto ensamblaje de un muro de suelo reforzado, estos se nombran y se definen a continuación:

Apoyo polimérico: Se utilizan como espaciador vertical durante el montaje del panel formando juntas horizontales (Figura 2.7). El material y la forma del apoyo varían de acuerdo a cada compañía y los requisitos del sistema en particular. Los materiales más comunes utilizados para la fabricación son el etileno propileno dieno monómero (EPDM) y polietileno de alta densidad (HDPE) (Figura 2.8). Por lo general las piezas tienen un grosor nominal que van de 18 a 25 mm, (define el espacio inicial entre los paneles). La rigidez mecánica de los apoyos está influenciada por el área de contacto debido a las cavidades o ranuras formadas en los apoyos. Estos tratamientos pueden resultar en una reducción del 20% al 30% en el área de contacto.

Desde el punto de vista estructural, las principales funciones son transferir cargas verticales del revestimiento y acomodar posibles asentamientos diferenciales entre el relleno y el paramento, el cual se vuelve semiflexible, evitando el contacto entre los paneles, por lo tanto, su compresibilidad debe ser consistente y en correspondencia con la compresibilidad del relleno reforzado. La rigidez de los apoyos debe ser tal que, una vez que se haya producido el asentamiento del suelo y la estructura ya esté en condiciones de estado de servicio, la geometría del apoyo deformada deje un espacio mínimo de 5 mm para evitar el contacto entre paneles. (Berg et al., 2009).

Se colocan como mínimo dos apoyos por junta, pero la rigidez, el tamaño y el número de apoyos se determinarán de modo que la abertura de la junta al final de la construcción sea de 5 mm. Se deberá presentar ensayos a compresión que verifiquen la rigidez axial de los apoyos utilizados.

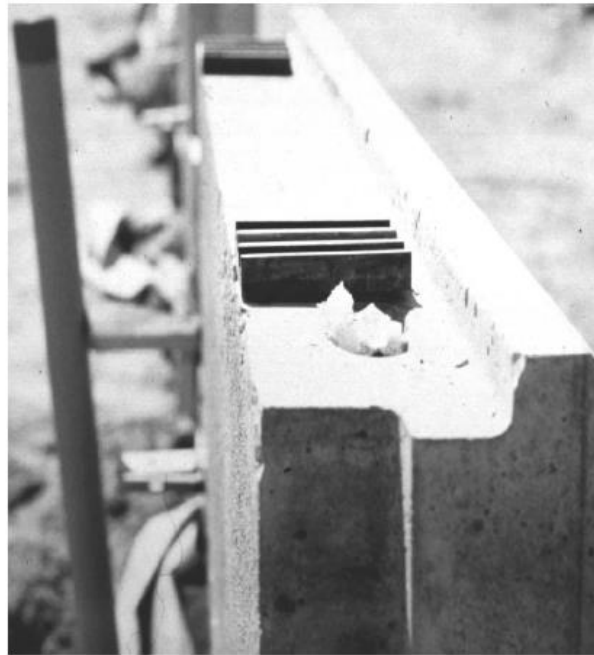


Figura 2.7.-Colocación de apoyos material EPDM (Berg et al., 2009).

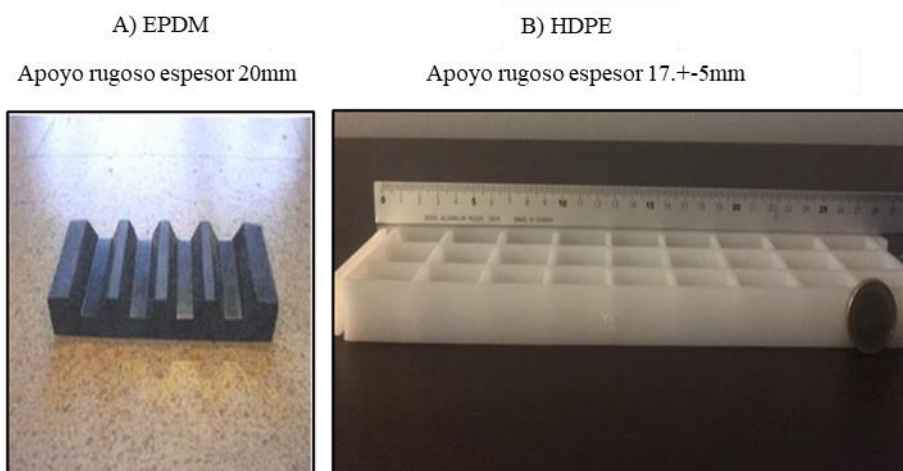


Figura 2.8.-Tipos y formas de apoyos, a) Etileno propileno dieno monómero (EPDM) y polietileno de alta densidad (HDPE).

Losa de nivelación: Consiste en una losa corrida provista con una superficie nivelada y lisa que facilite el montaje de la primera fila de panel durante la construcción. La dimensión de la losa tendrá un ancho y espesor mínimo de 0.35 m y 0.15 m respectivamente, el empotramiento o profundidad de la plataforma de nivelación se relaciona con consideraciones prácticas que garanticen un buen confinamiento estructural. Esta se debe basar en los requisitos de resistencia, asentamiento y estabilidad. Se adopta una profundidad de empotramiento (D) con un valor de diez a quince por ciento de la altura de pared cuando no hay riesgo adicional para la inestabilidad del suelo, bajo la hipótesis de terreno horizontal en el intradós (FHWA, 2009) (Figura 2.9).

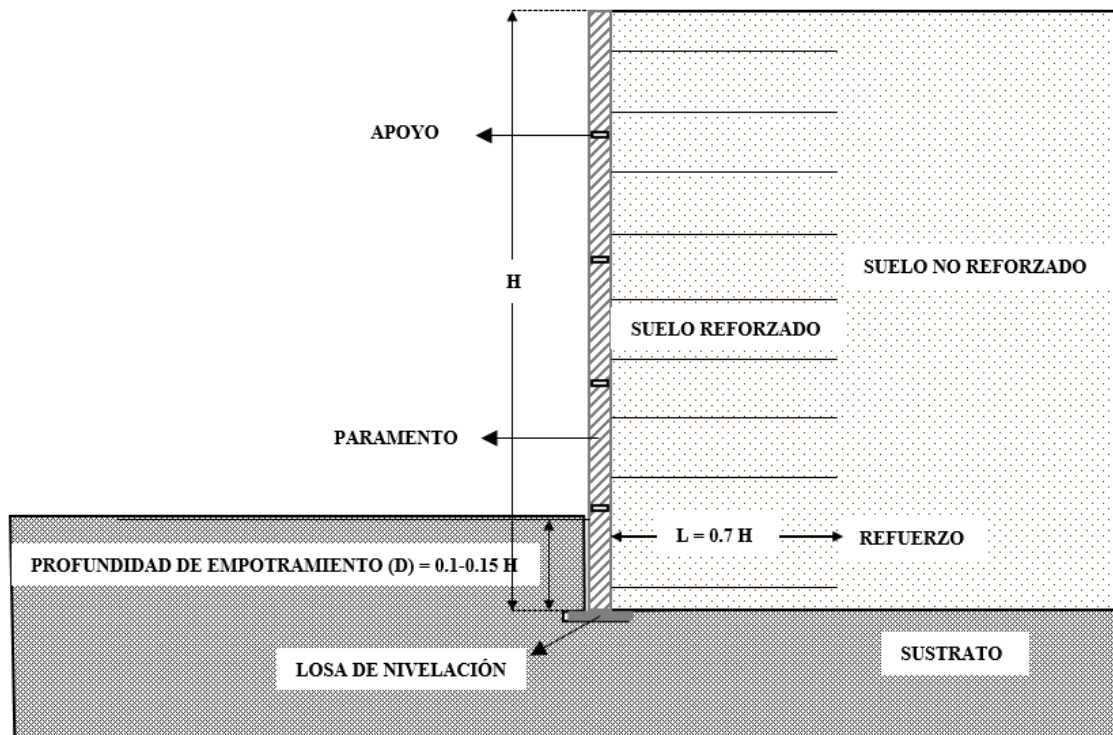


Figura 2.9.-Sección transversal de un muro de suelo reforzado. ubicación de la losa de nivelación, profundidad de empotramiento (D), suelo reforzado, suelo no reforzado y apoyos.

2.4 Principios del diseño en muros de suelo reforzado.

En la actualidad existen diversas metodologías de cálculo para el diseño de estructura de suelo reforzado basados en equilibrio límite Simplified Method, (Allen et al., 2001) y el Coherent Gravity Method para refuerzos de acero, (Bathurst et al., 2008) las cuales han sido mejoradas mediante ajustes realizados a observaciones de distintas estructuras. Es importante identificar los modos de falla para llevar a cabo un diseño optimizado en las estructuras de suelo reforzado, los mecanismos de falla, pueden agruparse en relación con la estabilidad externa e interna. Para el análisis de la estabilidad externa se considera la masa de suelo reforzado como una estructura sólida rígida donde los mecanismos de falla potencial a evaluar se describen brevemente a continuación: (Figura 2.10).

- Deslizamiento: para verificar la estabilidad del muro con respecto al deslizamiento se calculan las fuerzas que son aplicadas a la estructura al considerar que se comporta como un bloque rígido para posteriormente determinar el factor de seguridad con respecto al deslizamiento definido como la razón entre las fuerzas horizontales que impiden el deslizamiento y las fuerzas horizontales que empujan al suelo reforzado, esta debe ser mayor que 1.5, (AASHTO, 2012). Las fuerzas resistentes son el peso propio de la masa de suelo reforzado multiplicado por el coeficiente de fricción del suelo en la base del muro, mientras que las fuerzas que tienden a deslizar la zona reforzada, son el empuje activo generado por el suelo retenido sumado a la contribución que genera la sobrecarga.
- Vuelco o excentricidad: el análisis de este tipo de falla, consiste en verificar la ubicación de la fuerza resultante, encontrando el momento desestabilizador que podría producir el vuelco de la estructura. Es necesario generar un trapecio de presiones en la fundación, la

cual es la distribución óptima en el diseño de cimentaciones, esto se logra limitando la excentricidad de la fuerza resultante respecto al centro del muro. El factor de seguridad con respecto al volcamiento debe ser mayor de 2, (AASHTO, 2012) .

- Capacidad de soporte de la cimentación: la capacidad portante de un suelo, se calcula considerando los parámetros de resistencia al corte bajo condiciones analizadas. Estas deben ser lo suficientemente resistente para evitar la falla del terreno debido a las sollicitaciones que tenga el muro de suelo reforzado. La capacidad de soporte para muros mecánicamente estabilizados puede ser determinada mediante la ecuación de capacidad para una losa infinita. La capacidad de soporte admisible se calcula dividiendo la capacidad última por un factor de seguridad (Bowles, 1996). Donde dicho factor es de 2 a 2.5 (Berg et al., 2009) .
- Estabilidad global: para el análisis global se recomienda el uso de programas de análisis de estabilidad de taludes, dichos softwares trabajan la metodología de equilibrio límite, que consiste en evaluar la estabilidad para diferentes superficies de fallas posibles. Se recomienda verificar la estabilidad global para el tipo de falla circular y en cuña bajo diferentes consideraciones.

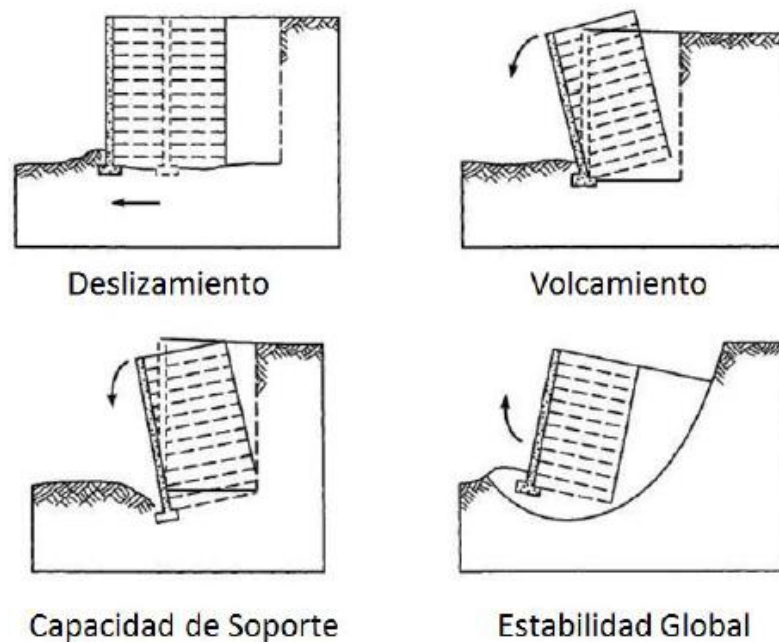


Figura 2.10.-Estabilidad externa del muro, distintos tipos de falla (Jara Mori, 2010)

La estabilidad interna corresponde al equilibrio de fuerzas internas de empuje y las fuerzas de fricción entre el refuerzo y el suelo. Los modos de falla de estabilidad interna incluyen la rotura del refuerzo (estado último de resistencia) y alargamiento excesivo del refuerzo bajo la carga de diseño (estado último de servicio). Las principales inestabilidades dentro del cuerpo del muro de suelo reforzado son, falla del elemento de refuerzo (resistencia de refuerzo inferior a la carga real

generada), falla de conexión de refuerzo y falla de tracción (resistencia al corte de la interacción suelo-refuerzo inadecuada). Cada uno de estos mecanismos de falla tiene verificaciones particulares que deben cumplirse. Se debe evitar el fallo de refuerzo para cualquier carga de tracción máxima, factorizada y desarrollada en cualquier capa de refuerzo en cualquier momento durante la vida de diseño del muro.

El concepto principal de la verificación de la estabilidad interna de los muros mecánicamente estabilizados, es la ubicación de la tracción máxima (Figura 2.11), la ubicación de esta línea geométrica define y proporciona un límite conceptual entre la zona activa (suelo que proporciona presión activa del suelo contra el paramento) y la zona resistente (zona donde el refuerzo proporciona fuerza de corte entre el suelo y el refuerzo). Mientras que la roturas internas y de conexión del refuerzo están relacionadas con la resistencia del material de refuerzo, estas usualmente se resuelven con suficiente cantidad de refuerzo o de lo contrario otro que posee una mayor resistencia, la falla de tracción relacionada con la longitud del material del refuerzo en la zona resistente L_e , o la rugosidad de contacto de refuerzo del suelo (que se define por el ángulo de fricción de la interacción relacionada), la resistencia a la tracción debe ser igual a las tensiones de corte desarrolladas en toda el área de contacto entre el suelo de relleno y el refuerzo. De acuerdo con esto, la resistencia a tracción en unidades total se entiende teóricamente como la suma de las tensiones de corte a lo largo de la longitud de resistencia del refuerzo (L_e).

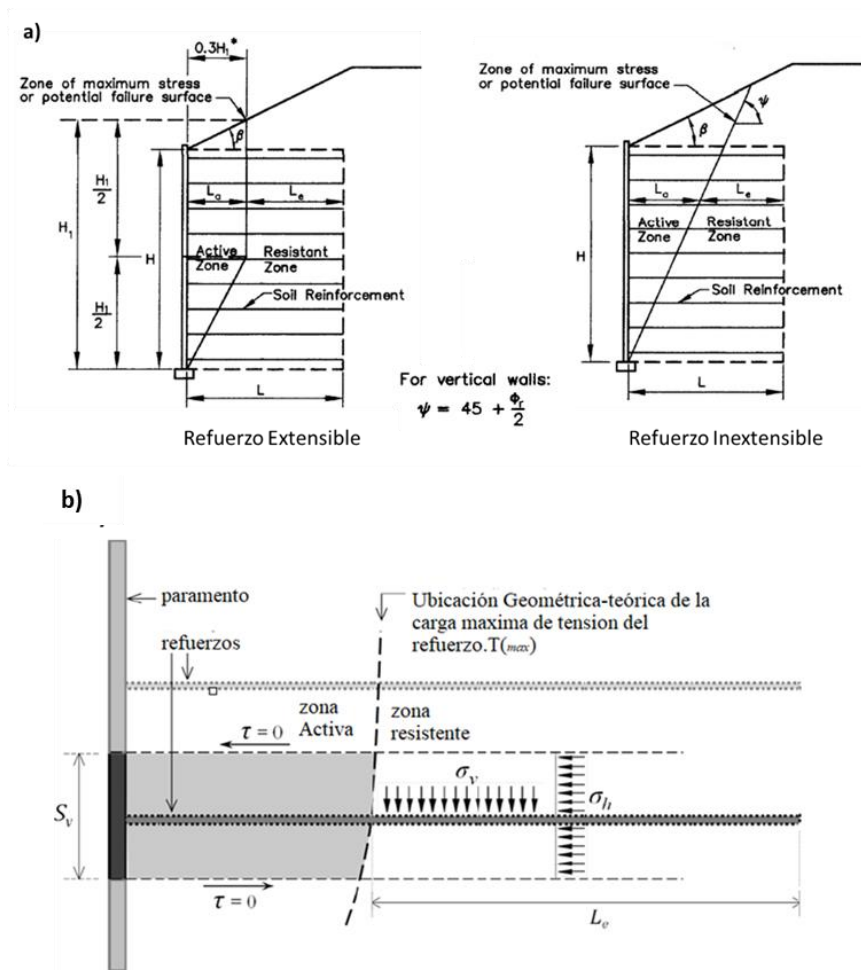


Figura 2.11.-Ubicación de las cargas máximas de tracción (T_{max}) con respecto a la extensibilidad del refuerzo (a) y las cargas que actúan en refuerzos: concepto de longitud de resistencia (b) (Puig, 2016)

2.5 Patología en servicio.

Diversas metodologías de cálculo han sido implementadas para cuantificar el estado tensional tanto a nivel de estabilidad interna como estabilidad externa de la masa de suelo y los elementos que componen un muro de suelo reforzado basado en equilibrio límite (AASHTO 2012; Berg et al., 2009; Allen et al., 2001), sin embargo, ninguna de estas metodologías de cálculo establece niveles de deformación bajo carga que puedan tener los distintos componentes estructurales.

2.5.1 Asientos relativos.

Los muros de suelo reforzado en condiciones operativas, pueden dar lugar a diversos estados de servicios debido a una mala práctica de construcción (procedimiento de compactación deficiente, humedad inadecuada del material de relleno) o asentamientos relativos entre el relleno (acompañado de asentamiento del suelo de cimentación) y el paramento.

El asentamiento relativo entre el paramento y el relleno, genera un mecanismo que concibe fuerzas de corte movilizadas hacia abajo desarrolladas en el lado interno del paramento al igual que fuerzas de tracción de arrastre hacia abajo generada en las conexiones de refuerzo (desplazamiento que tiende a generar un movimiento del refuerzo hacia abajo con respecto a su posición original) generando sobrecargas axiales transmitidas en el panel que a su vez se transfieren a los apoyos poliméricos. Los apoyos compresibles, permiten desplazamientos verticales del panel para acomodar los asentamientos relativos y reducir las cargas de arrastre hacia abajo, Por lo tanto, su compresibilidad debe estar en consonancia con la compresibilidad del relleno que puede depender también de la compresibilidad del suelo de cimentación. La rigidez de los apoyos debe ser tal que, una vez que se haya producido el asentamiento del suelo y la estructura ya esté en condiciones operativas, la geometría del apoyo deformado (cierre de la junta horizontal) deje un espacio abierto de al menos 5 mm para evitar el contacto entre los paneles (Berg et al., 2009).

De lo contrario si los de apoyos son demasiado compresibles y / o si el número colocado en cada junta horizontal es insuficiente, se produce un aplastamiento del apoyo y como consecuencia un contacto entre las unidades adyacentes del paramento (Neely, 2005), (Neely et al., 2010) (Figura 2.12). Este tipo de fallo no amenaza la estabilidad general de la estructura, se clasifica como moderadamente significativo. Se recomienda que los apoyos resistan una fuerza como mínimo de 2 a 3 veces el peso propio del panel (Berg et al., 2009), sin embargo, en muros debidamente instrumentado muestran que las fuerzas axiales registradas son superiores a 3 veces el peso propio del panel (Christopher et al., 1994, Runser et al., 2001). Es conveniente definir como un factor de carga vertical a la relación entre la carga axial total y el peso propio de la columna del paramento.

En la figura 2.13 se muestra un esquema de cómo se transmiten las fuerzas de arrastre hacia el paramento debido a las fuerzas de corte movilizadas y desarrolladas en el lado interno del revestimiento, al igual que la carga de tracción de arrastre hacia abajo generada en las conexiones de refuerzo.



Figura 2.12. -Aplastamiento de almohadillas de apoyo, fragmentación del paramento, (Neely et al., 2010).

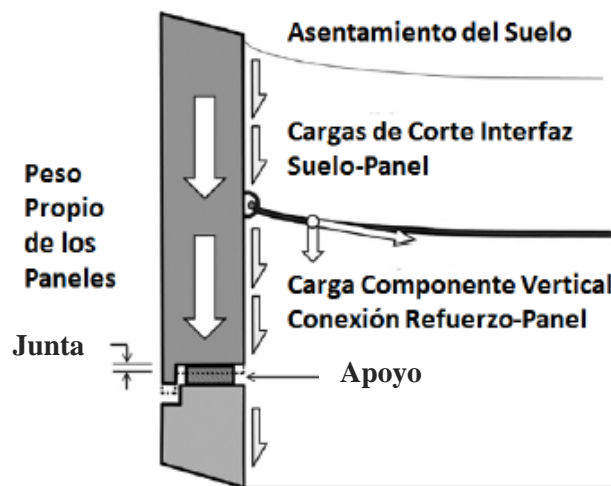


Figura 2.13. -Contribución de fuerzas verticales en el paramento (Puig, 2016)

Dada la complejidad de la interacción de un muro de suelo reforzado y sus componentes, es difícil predecir la magnitud de estas fuerzas de arrastre descendente dentro del panel, ya que estas cargas se deben al movimiento relativo entre el paramento, el suelo de relleno y la interacción compleja en las conexiones panel-refuerzo.

En el 2005, Foster geotechnical propuso una expresión teórica para el cálculo de las fuerzas debido al rozamiento que se genera en los muros de suelo reforzado mediante equilibrio de tensión de una porción de suelo en contacto con el panel y limitada al área de un menor esfuerzo de compactación aplicado durante la construcción que típicamente es de 1 a 1.5 m. Los resultados a partir de este desarrollo analítico mostraron que las fuerzas causadas por la fricción entre el relleno y el paramento muestra que son superiores al peso propio del paramento, y su evolución con la profundidad aumenta. Sin embargo, el problema real puede incluir más complejidad que las tensiones de corte movilizadas entre el relleno y el paramento y debe requerirse modelos numéricos para proporcionar una idea más clara sobre las fuerzas de arrastre generadas para distintos materiales de relleno, refuerzos y numero de apoyo que dan como resultado el aplastamiento del mismo.

Capítulo 3: Muro de estudio.

3.1 Introducción.

En este apartado, se describen las propiedades de los componentes estructurales que posee el muro en estudio y las características de los suelos. Se explica el proceso de la toma de medidas del cierre de las juntas horizontales y los instrumentos utilizados, así como también el software para medir el cierre de las juntas ubicadas en lo alto del muro a través de fotografías tomadas in-situ. Se considera que el cierre de las juntas se debe al aplastamiento del apoyo y el giro relativo debido al desplazamiento del panel. Mediante el aplastamiento del apoyo (cierre de la junta horizontal) y conociendo las propiedades resistentes del apoyo se determina las fuerzas que actúan sobre cada una de las juntas horizontales.

3.2 Descripción del muro.

En este apartado se da a conocer la ubicación de la obra de estudio y se describe con detalles las propiedades físicas y dimensiones de los componentes que forman la estructura de suelo reforzado. La obra de estudio posee dos muros paralelos entre sí, separados por una distancia de 22 m, uno con cara hacia el Este y el otro hacía el Oeste con una longitud total de 416 y 366 metros de largo respectivamente.

3.2.1 Ubicación.

La obra de estudio se encuentra a 15 kilómetros al Noroeste de Barcelona en el municipio de Montada y Reixac, en la carretera nacional N-1, C-17.

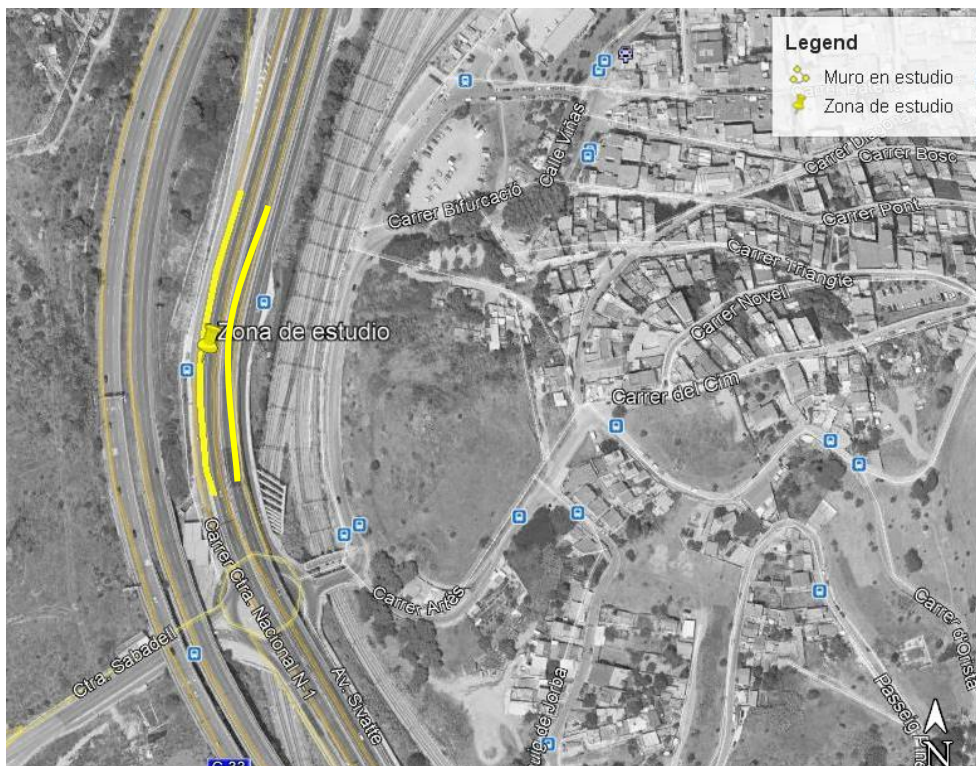


Figura 3.1.-Ubicación de obra de estudio.

3.2.2 Suelos.

En este apartado se muestran las propiedades físicas y resistentes de los suelos utilizados en la obra de estudio.

3.2.2.1 Sustrato.

La información geológica disponible de la zona indica que la obra ubicada a 700 metros del río Besós se encuentra sobre un suelo de formación Aluvial (Qt1), se trata de una mezcla de suelos granulares, arenas y gravas rodadas, con niveles intercalados de arcilla y limos. (Figura 3.2). La información sobre parámetros resistente y propiedades del suelo se obtuvo del anexo de los sondeos realizados del 2005-2006 procedentes de la campaña de investigación geotécnica para el proyecto de la construcción de la línea de alta velocidad del tramo Trinidad-Montcada que se realizaron a 475⁺ metros de la obra.

En el Sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) estos materiales se identificaron desde gravas arenosas (GP-GM) hasta arcillas arenosas o limosas de baja a media plasticidad (CL) y una mezcla de materiales muy heterogéneos. En la tabla 3.2, 3.2 y 3.3 se muestran los resultados de la campaña de sondeos.

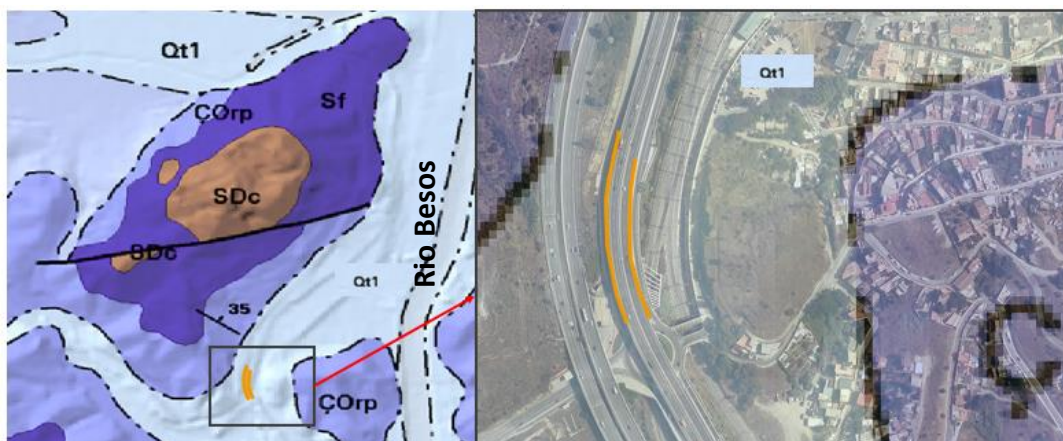


Figura 3.2 Información geológica de la zona del suelo en que se encuentra la obra (Instituto Cartográfico y Geográfico de Catalunya ICGC).

Tabla 3.1. -Propiedades físicas del suelo de fundación.

Propiedades físicas		Promedio y/o valores recomendados
Densidad aparente	$\gamma_{ap}(t/m^3)$	2.1
Humedad natural	%	20.4
Contenido de finos	(%)	22.6
Límite líquido	LL(%)	25.1
Índice de plasticidad	IP(%)	7.4

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

Tabla 3.2.-Propiedades resistentes del suelo de fundación.

Propiedades resistentes		Promedio y/o valores recomendados
Resistencia a compresión simple	RCS(kp/cm ²)	0.2-0.7
Cohesión efectiva	c'(MPa)	0.01
Angulo de rozamiento efectivo	ø (°)	35
Numero de golpes SPT	NSPT	19
porcentaje de rechazo SPT	R	3%

Para la estimación del módulo de deformación se emplearon correlaciones empíricas, válida para materiales granulares, arenas y gravas. Los depósitos aluviales en el que se encuentra la obra es fundamentalmente suelo granular con gravas, para un valor medio de N igual a 19 el módulo de Young será igual a 30MPa (tabla 3.3)

Tabla 3.3-Modulo de Young a partir de correlaciones del SPT.

Tipo de suelo	Autor	Formula	NSPT	E (formula)	E (MPa)
Granular	Boutes	$E=7.5+0.5 \cdot \text{NSPT}$	19	17 MPa	17
	Begemann	$E=40+12 \cdot (\text{NSPT}-6)$	19	196 kp/cm ²	19.6
Granular-gravas	Wrench-nowatzi	$E= 2.22 \cdot \text{NSPY}^{0.888}$	19	30 MPa	30
	D'appollonia	$E=187.5+7.56 \cdot \text{NSPT}$	19	331.10 kp/cm ²	33.1

En la tabla 3.4 figuran el valor promedio de los ensayos de compactación realizados sobre las muestras en los sondeos. (tabla 3.4).

Tabla 3.4-Ensayos de compactación a dos muestras del suelo de fundación.

Compactación		Promedio
Proctor modificado	Densidad máxima (T/m ³)	2.23
	humedad óptima (%)	6.3

3.2.2.2 Relleno.

Propiedades físicas el material de relleno utilizado en la estructura proviene de un acopio ubicado en Lafarge (Montcada), las características del suelo de acuerdo a los informes del laboratorio realizados sobre muestras del acopio son las siguientes:

- Peso específico = $\leq 20.5 \text{ kN/m}^3$
- Humedad optima = 7.8%
- Angulo de rozamiento interno = 34°
- Cohesión = 0 kPa
- Limite liquido = 24.3
- Limite plástico = 13.8
- Índice de plasticidad = 10.5
- PH = 7.83
- Resistividad del suelo: -Estado natural = 38500 Ωcm ,
-Suelo saturado 24h = 23500 Ωcm

3.2.3 Refuerzos.

En la obra de estudio se utilizaron refuerzos inextensibles tipo mallas de acero o también conocido como escaleras de acero con barras de 8 mm de diámetro (figura 3.2), la longitud de refuerzo varía en función de la pared correspondiente la relación L/H es igual al 61 por ciento de la altura de la pared, la altura del primer refuerzo se colocó a 0.375 m medido desde la parte inferior del panel con una separación vertical de 0.75 m entre refuerzo superior e inferior. En la figura 3.2 se observan dos detalles de secciones representativas donde se aprecia la longitud y separación vertical del refuerzo para distintas alturas de pared. El número de mallas o escaleras de refuerzo colocados por panel aumenta con la profundidad del muro (medido desde la corona del muro).

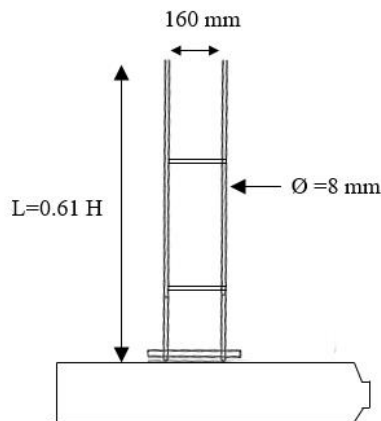


Figura 3.3.-Detalle del refuerzo tipo malla de acero o escalera de acero.

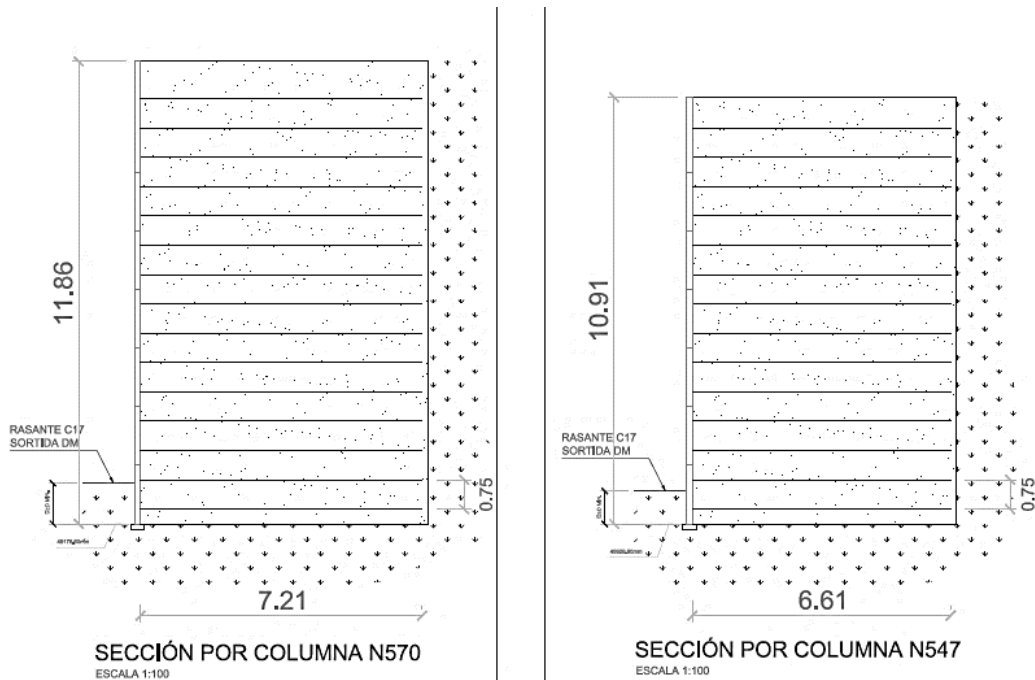


Figura 3.4.-Detalle, sección transversal, longitud y separación vertical para distintas alturas de muro (unidades en metros).

3.2.4 Paramento.

Se utilizaron paneles prefabricados de hormigón armado de forma rectangular (Figura 3.5) con dimensiones de 2.25 m de ancho, 1.5 m de altura y un espesor de 0.15 m. También se colocaron paneles con alturas que varían de acuerdo a la altura de coronación del muro.



Figura 3.5.-Panel rectangular utilizados en la obra.

3.2.5 Profundidad de empotramiento.

En la obra se utilizó una profundidad de empotramiento que varía de doce a trece veces la altura del muro.

3.2.6 Apoyos.

En la obra en estudio se utilizó un apoyo tipo gofre compuesto de polietileno de alta densidad (HDPE) con una longitud de 282.50 mm, un ancho de 61.50_{+50}^{-50} mm y un espesor de 17.50_{+50}^{-50} mm de espesor (apertura de las juntas horizontal) (Figura 3.6).

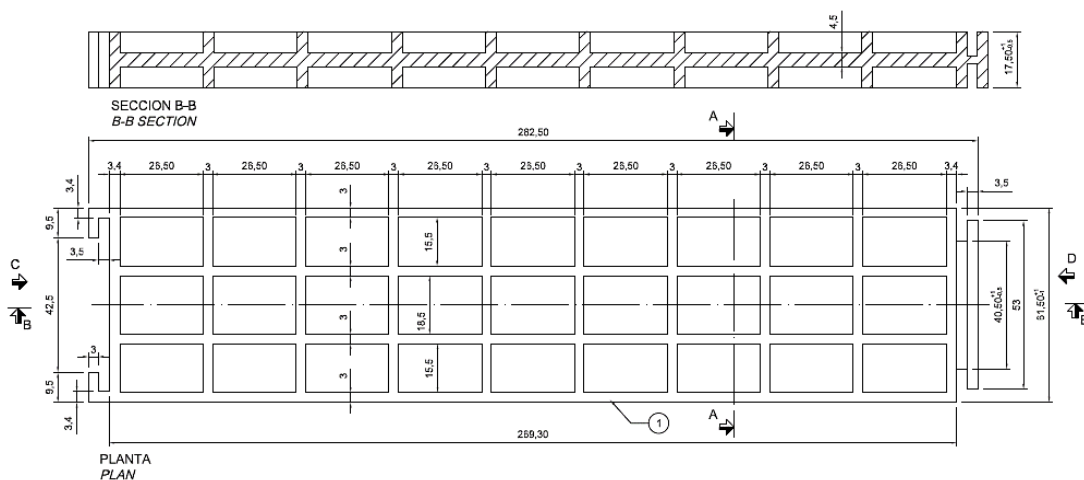
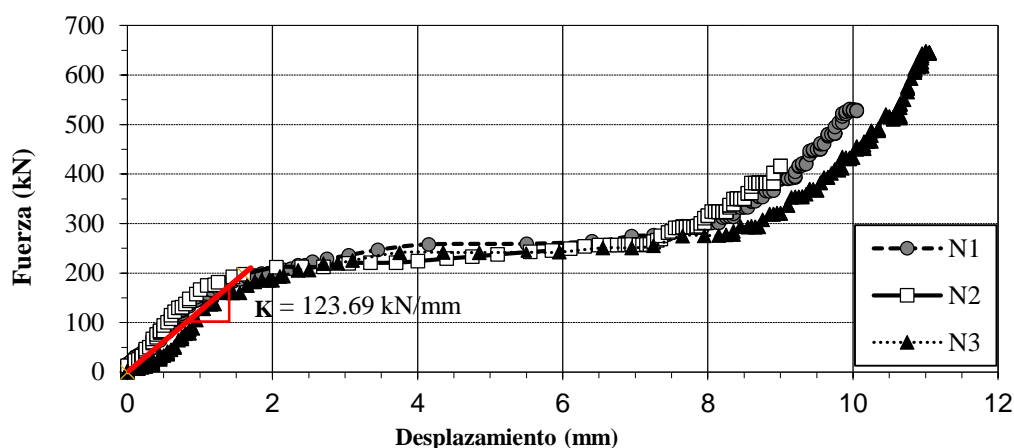


Figura 3.6.-Apoyo tipo gofre, material polietileno de alta densidad (HDPE).

Para definir las propiedades resistentes del apoyo, se tomaron los datos de ensayos a compresión realizados sobre tres muestras (N1, N2, N3) de los apoyos que se utilizaron en la obra. En los resultados mostrados en la figura 3.5 se aprecia un comportamiento trilineal, donde las muestras alcanzan el límite elástico al comprimirse unos 1.6 mm (8% de deformación) aplicando una fuerza de 200 kN, a partir de entonces, el material entra en plastificación o tramo de fluencia (deformación a tensión constante) hasta llegar a los 8 mm de compresión (45% de deformación), luego se observa que el material tiende a endurecer, es decir el apoyo tiende a ser más rígido a medida que aumenta la deformación.

A)



B)

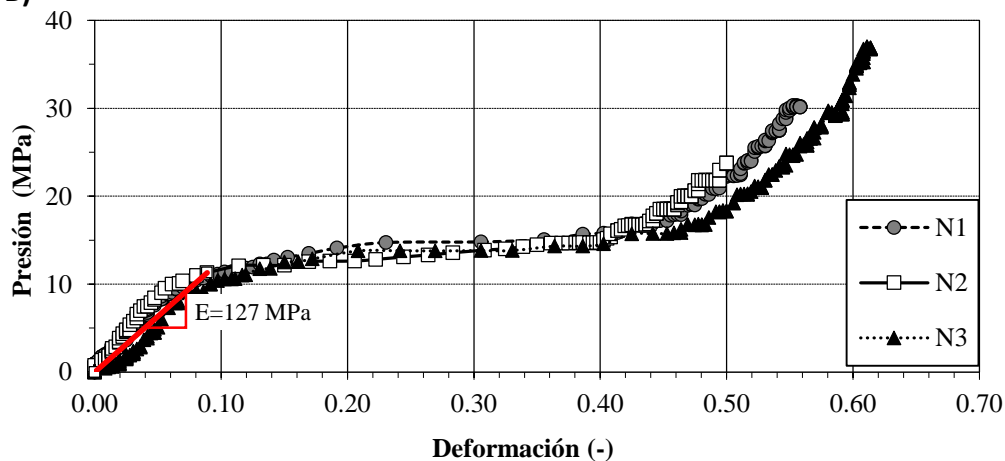


Figura 3.7.-Comportamiento a compresión, apoyo tipo gofre, material polietileno de alta densidad (HDPE), A) Gráfico fuerza- desplazamiento B) Gráfico presión deformación (VSL, 2008).

3.3 Cerramiento de la junta horizontal.

En este apartado, se detalla el procedimiento seguido, herramientas y software utilizado para obtener del cierre de las juntas horizontales, se muestran los resultados de las medidas en función de la profundidad de la misma.

3.3.1 Metodología.

Para una mejor comprensión del comportamiento del cierre de las juntas horizontales, a lo largo del alzado del muro se dividió la toma de medidas en secciones donde cada sección está compuesta por dos columnas de panel (panel izquierdo y panel derecho). Las secciones se enumeraron desde la parte más alta del muro hasta la parte más baja (Figura 3.8). Una vez obtenido el cierre de todas las secciones analizadas, se procede a agrupar cada una de estas de acuerdo a la altura de muro (medido desde la parte superior de la losa de nivelación) que representa cada sección.

Las medidas se realizaron desde el 22 de febrero hasta el 3 de mayo del año 2019. Debido a que en secciones de gran altura de muro no es posible medir el cierre de las juntas horizontales utilizando un pie de rey, se recurre a la toma de fotografías y el uso de software de procesamiento de imágenes digitales, mediante el cual se relaciona la cantidad de píxel en una escala de referencia (dimensión ya conocida por el usuario, en caso actual altura del panel) y de manera efectiva y precisa se obtiene una longitud por unidad de píxel en la fotografía. Para la toma de las fotografías se utilizó una cámara Canon EOS Rebel T3, con una resolución de 12.2 megapíxeles para un tamaño de imagen de 4272 x 2848. Para evitar la distorsión angular las fotografías fueron tomadas utilizando un trípode y ajustando el plano de la fotografía ortogonal al plano de paramento. El software utilizado en el presente trabajo de investigación se conoce como “ImageJ”.

ImageJ es un software de análisis y procesamiento de imágenes digitales, enfocado en el ámbito de las ciencias de la salud de dominio público y código abierto desarrollado en lenguaje Java en las instituciones del grupo National Institute Of Health. Enlazado por una gran cantidad de usuarios, esta herramienta de análisis y procesamiento de imágenes lo debe todo a su rapidez y arquitectura basada en plug-ing, lo que amplía sus posibilidades de uso en diferentes áreas. El programa proporciona una gran cantidad de herramientas de edición, procesado y análisis de imágenes aplicables de 8,16 y 32 (RGB) bits, y de diversos formatos (JPG, BMP, PNG, GIF, BMP, DICOM, FITS y RAW), se adapta fácilmente a las necesidades de distintas áreas de trabajo en campos diversos, en nuestro caso en el área de ingeniería ofreciendo un panel de funciones que va desde la colorimetría, análisis de contornos, filtros de imágenes, cálculos de áreas, ángulos, distancias entre píxeles e histogramas de densidad.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

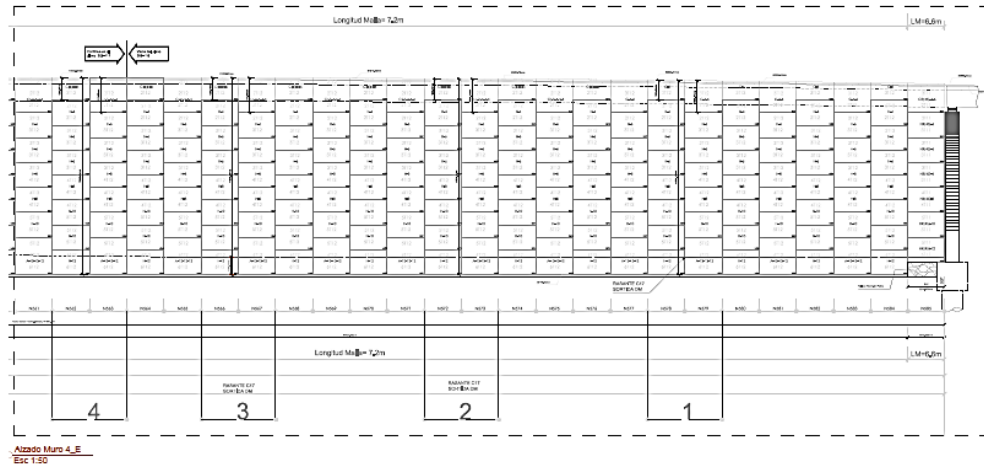


Figura 3.8.-Alzado Muro 4, esquema de división de secciones a lo largo del muro.

3.3.2 Medidas directas in-situ.

Las medidas del cierre de las juntas horizontales se realizaron utilizando un calibre o pie de rey con una precisión de 0.05 mm (Figura 3.9), en la obra se tomaron dos medidas por panel, la primera en el lateral izquierdo y la segunda en el lateral derecho, para luego tomar la media entre ambas y obtener valor promedio del cierre de la junta entre panel, la profundidad para cada junta horizontal (medido desde la corona del muro) se toma de acuerdo a los planos de la obra en estudio. Como resultado del promedio de cierre de la junta en función de la profundidad de la misma se obtienen la figura 3.10 que representa las medidas del cierre obtenidas en el campo de la sección número 1, que representa la columna 207 y 208 de acuerdo a los planos.

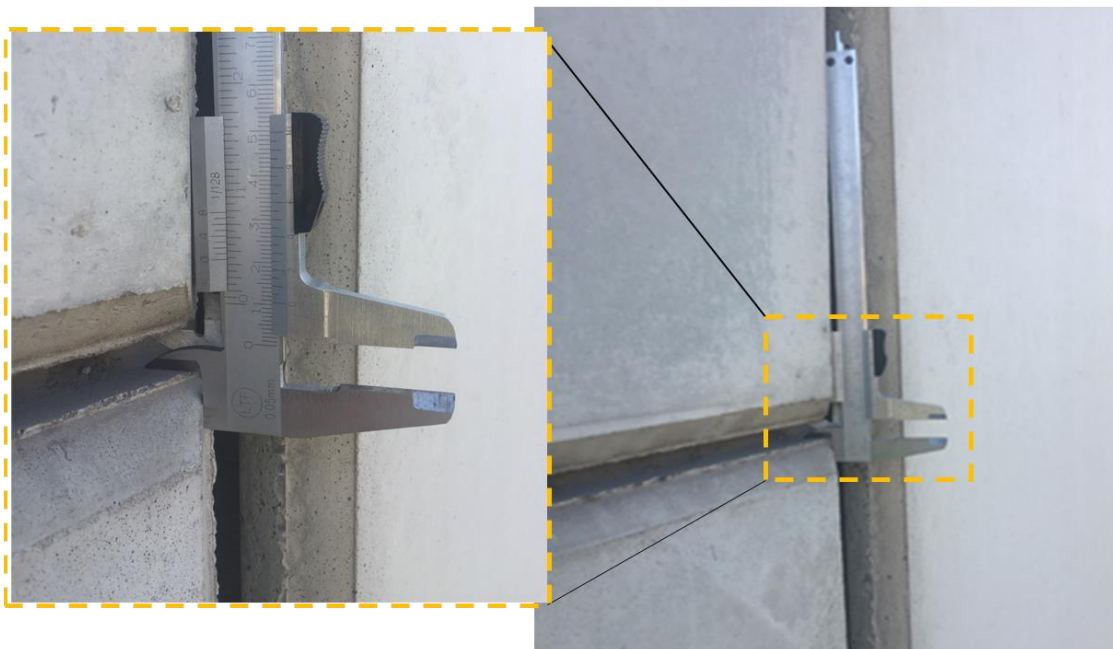


Figura 3.9.-Medida del cierre de la junta horizontal en el lateral derecho del panel utilizando calibre o pie de rey.

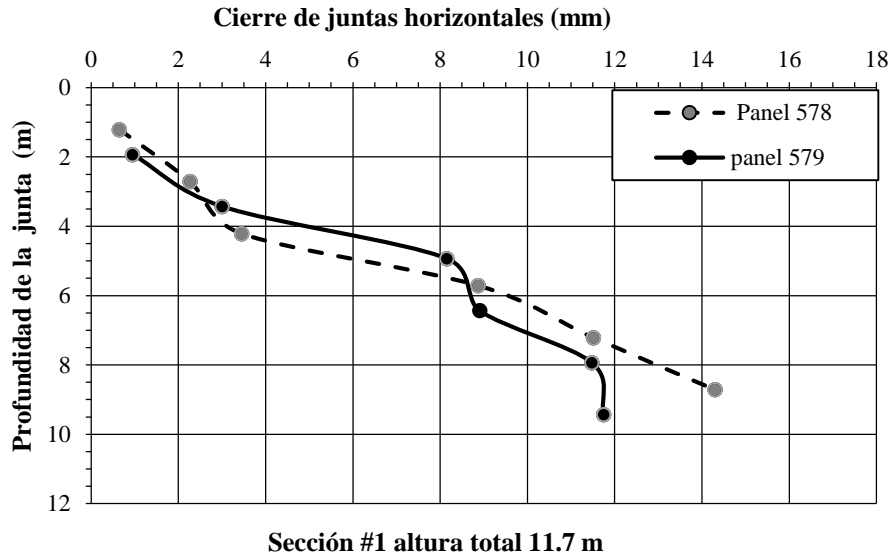


Figura 3.10- Gráfico de representación del cierre promedio medido en función de la profundidad de la sección No.1.

3.3.3 Medidas mediante software imageJ.

El procedimiento para determinar la separación mediante el software ImagenJ, es el siguiente:

El primer paso para determinar el cierre de la junta, es asignar una escala de referencia (distancia conocida) en la fotografía analizada, la longitud de la escala de referencia varía de acuerdo a la unidad deseada (metro, centímetro, milímetros, micrómetros, nanómetros etc.), la referencia de escala en la fotografía en nuestro caso, es la altura del panel que resulta ser 1.5 m (1500 mm) el software determina la distancia por píxel entre los dos puntos de la escala de referencia resultando una distancia 532.71, para una escala de 0.3551 píxel/mm (Figura 3.11).

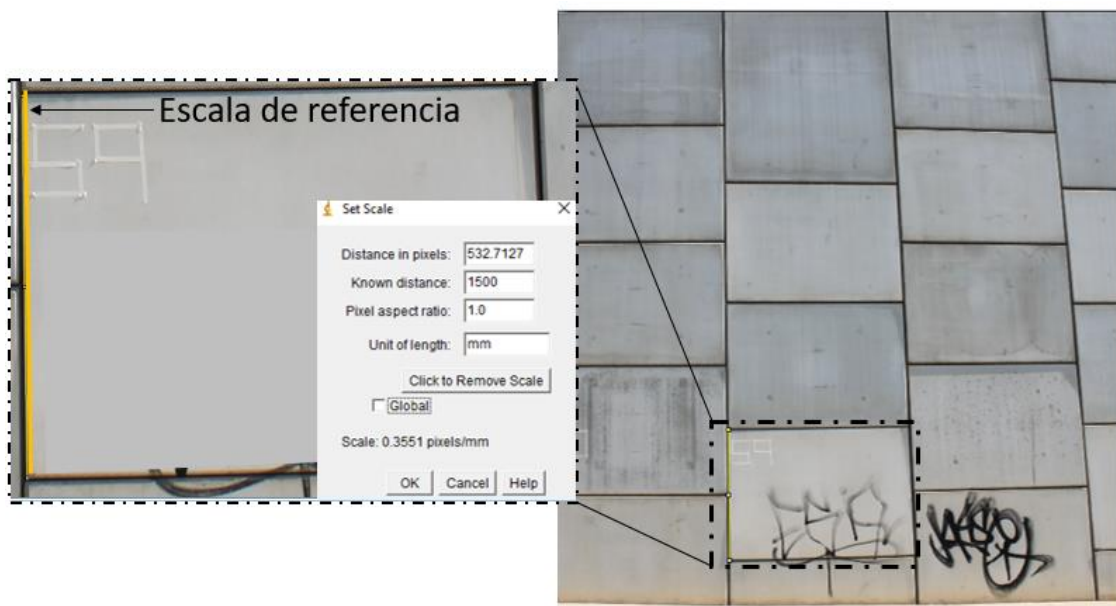


Figura 3.11.-Escala de referencia lateral izquierdo del paramento, Software ImageJ.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

Luego se procede a determinar la apertura de la junta horizontal por encima y por debajo de la escala de referencia (lateral izquierdo del panel). Dando como resultado un valor de separación entre panel en las juntas en la parte inferior y superior del paramento de 10.64 y 13.35 mm respectivamente, el cierre de la junta horizontal resulta ser la diferencia entre la separación inicial del panel (espesor del apoyo) con un valor de 18 mm y la separación final medida mediante el software. (Figura 3.12).

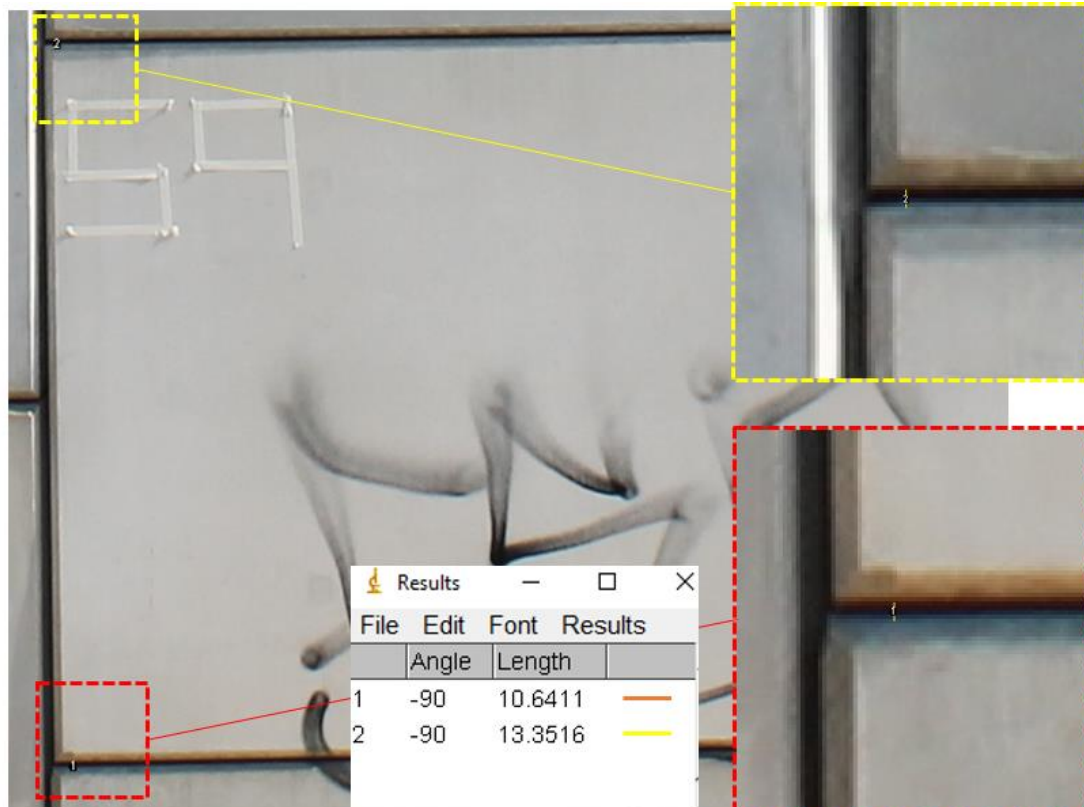


Figura 3.12..-Medida de las juntas horizontales en base a escala de referencia en el lado izquierdo del panel, Software ImageJ.

Debido al efecto de la distorsión angular en las imágenes, se realizan dos medidas de la separación de las juntas tomando como referencia de escala el panel superior e inferior para luego tomar la media de ambos resultados como resultado final para ese lateral, este procedimiento se muestra gráficamente en la figura 3.13.

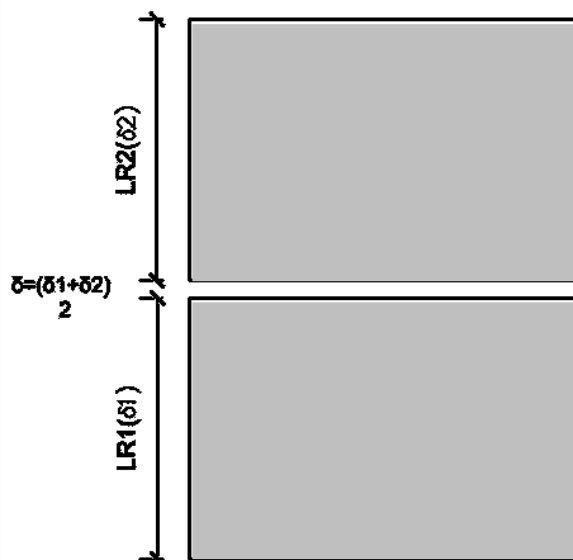


Figura 3.13-Ejemplo promedio de medidas de acuerdo a la escala de referencia.

Donde:

LR1 = Escala de regencia panel inferior.

$\delta 1$ = Separación a partir de línea de referencia panel inferior.

LR2 = Escala de regencia panel superior.

$\delta 2$ = Separación a partir de línea de referencia panel superior.

δ = Promedio de cierre entre $\delta 1$ y $\delta 2$

Cada uno de estos pasos se realizan en cada extremo del panel (Lateral izquierdo y lateral derecho) donde a partir de estas medidas se toma un valor promedio de separación entre panel. La profundidad para cada junta horizontal (medido desde la corona del muro) se toma de acuerdo a los planos de la obra en estudio.

Cabe destacar que la toma de medidas en el software ImagenJ es proceso manual, donde la precisión de las medidas dependerá de la buena vista del usuario y resolución de las imágenes.

Por último, en una hoja de cálculo se agrupan las medidas realizadas in situ y las obtenidas a través del software mediante fotografías.

3.4 Resultado de medidas del cerramiento.

En este apartado, se muestran los resultados de todas las medidas realizadas en la obra de estudio, en total se realizaron 548 medidas. Para analizar más detalladamente el cierre de las juntas en función de la profundidad y la altura total del muro, las secciones se agrupan en diferentes rangos de altura, resultando en 4 grupos de alturas que van de: 8-9 m, 9-10 m, 10-11 m y 11-12 m (Figura 3.14). Las secciones agrupadas por altura de muro similar, muestran diferencias de cierre de hasta 6 mm para una profundidad de juntas similares, Debido a estas diferencias, se procede a determinar el promedio del cierre para profundidades de juntas similares, con el objetivo de obtener una tendencia del cierre de las juntas para cada rango de alturas de muro. (Figura 3.15).

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

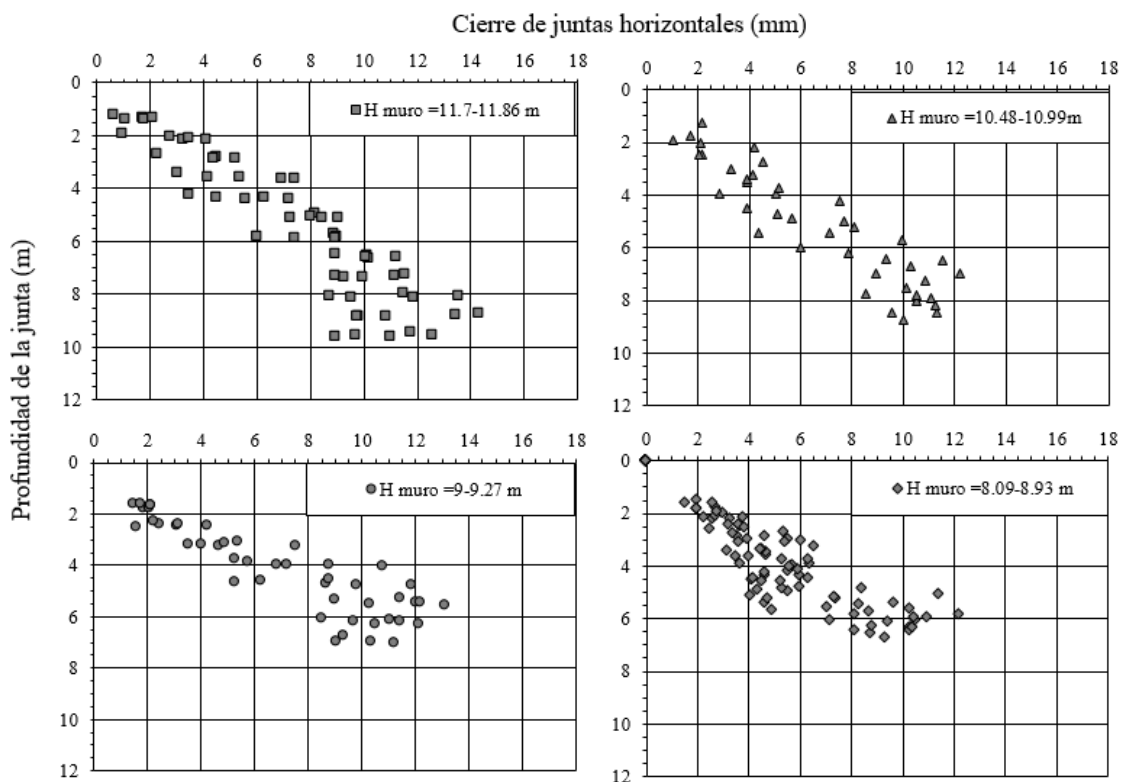


Figura 3.14.-Gráfico del cierre de juntas horizontales para secciones agrupadas por rangos de alturas de muro.

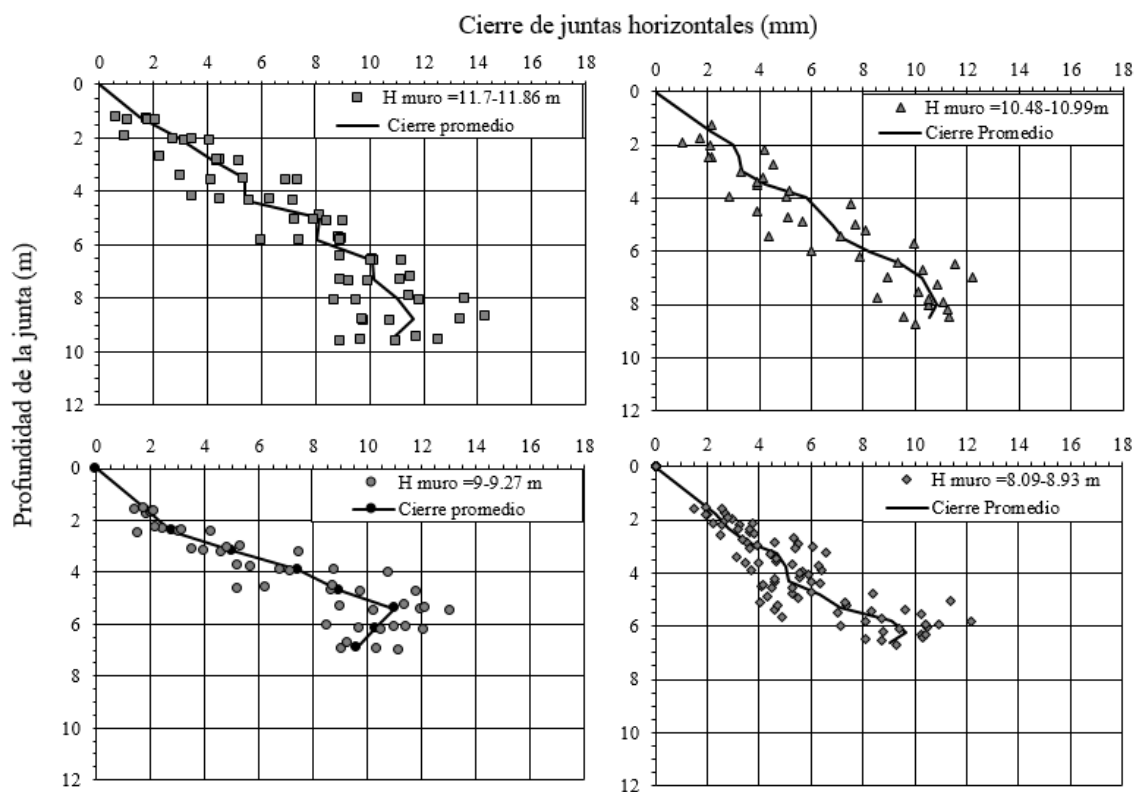


Figura 3.15.-Gráfico del cierre promedio de las juntas en función de la profundidad para las secciones agrupadas por rangos de alturas de muro.

3.4.1 Corrección por giro entre panel.

En la obra de estudio, se lograron percibir que en lo largo de todo el muro, existen desplazamientos horizontales relativos entre paneles (giros) hacia el interior del relleno reforzado y hacia el exterior del mismo, como se observa en la figura 3.16, el giro o desplazamiento relativo entre paneles contiguos en la vertical tiene un efecto directo en las medidas tomadas en obra, provocando un cierre en las juntas horizontales en la cara del paramento que no corresponde a la compresión del apoyo, este efecto se describe de manera gráfica en la figura 3.17, donde se muestra un desplazamiento en el panel inferior de 15 mm hacia el interior del relleno y otro desplazamiento de igual magnitud pero en sentido contrario hacia el exterior del relleno al panel superior, en el ejemplo mostrado a continuación, el apoyo no sufre ninguna deformación (apertura de la junta horizontal igual a 18 mm) con el objetivo de apreciar el cierre debido a los desplazamientos del panel, como resultado, la separación final de la junta horizontal en la parte frontal resulta ser 16.60 mm dando un valor de cierre de 1.4 mm, cierre que resultarían reflejados como una fuerza mayor actuando sobre los apoyos.



Figura 3.16.-Desplazamientos relativos entre panel, observados en obra de estudio. Señal amarilla desplazamiento hacia el interior del relleno, señal roja desplazamiento hacia el exterior del relleno.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

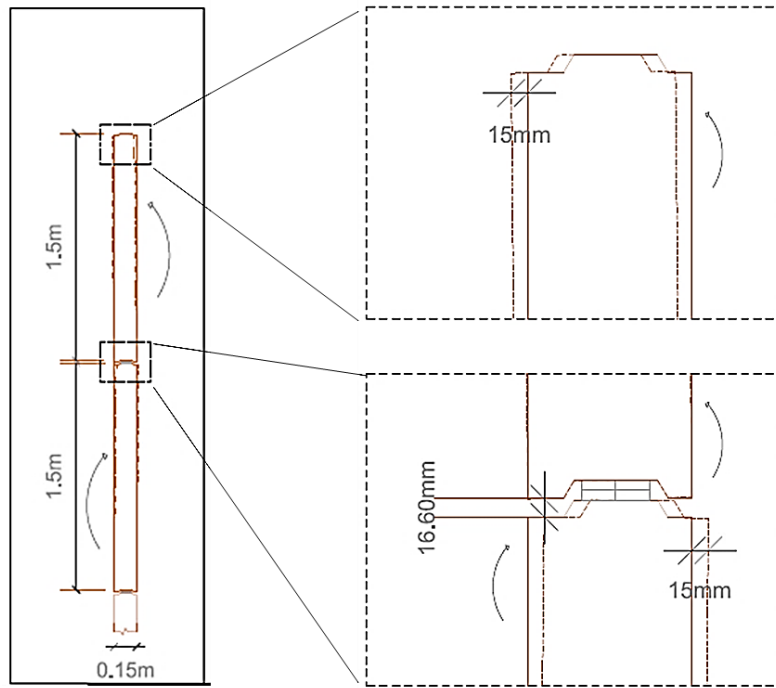


Figura 3.17.-Efecto de los desplazamientos relativos(giro) entre panel y cierre de la junta horizontal.

La figura 3.18 es una curva con base empírica para estimar los desplazamientos laterales en función de la relación que existe entre el largo del refuerzo y la altura del muro. Para una explicación adicional sobre esta figura ver (Berg et al., 2009). En base a la curva empírica se obtiene un valor aproximado de los desplazamientos horizontales máximos correspondientes a las alturas del muro de estudio.

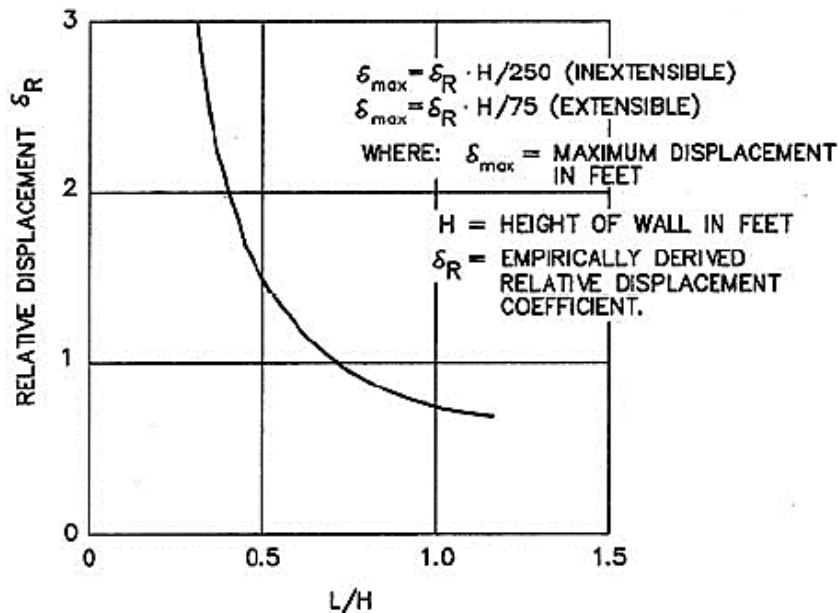


Figura 3.18.-Curva empírica para estimar el desplazamiento lateral durante la construcción del muro. (AASHTO, 2012)

Nota: basado en un muro de 6 metros de altura, para muros superiores de 10 metro de altura y cimientos blandos los desplazamientos relativos aumentan aproximadamente un 25%.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

De acuerdo con las características de la obra de estudio, se utilizaron refuerzos de acero inextensibles con una relación $L/H = 0.61$, debido a que se considera el sustrato relativamente blando, donde las deformaciones obtenidas en la curva se aumentan un 25%, los desplazamientos máximos obtenidos en base a la curva empírica se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.5.-Resultados desplazamientos laterales máximos a partir de curva empírica.

Altura de muro (m)	Desplazamientos máximos (mm)
11.80	71
11	66
9.25	56
8.9	54

A partir de los desplazamientos máximos, se realiza un ajuste en el promedio de las medidas restándole el cierre a causa de la rotación del panel. El cierre de la junta a causa del desplazamiento se obtiene de acuerdo al grosor de la placa y al ángulo de giro relativo entre ambas.

$$A = B \sin (\text{ángulo})$$

Donde:

A= cerramiento debido al giro(mm).

B= mitad del grosor del paramento.

En obra, los desplazamientos horizontales máximos se observaron que ocurrían en una distancia del sesenta por ciento de la altura total (medido desde la parte superior de la losa de nivelación), en la figura 3.2, se muestran las tablas de distribuciones de los desplazamientos relativos para distintas alturas del muro, y el cierre de las juntas debido a estos. El resultado obtenido al restar el cierre de las juntas debido al giro del panel y el promedio del cierre medido en obra, se muestra en la figura 3.19, donde el ajuste realizado al promedio del cierre de las juntas tiene un comportamiento similar a las medidas mínimas de los cierres registrados.

Altura de muro 11.7-11.86 m			Altura de muro 10.48-10.99 m		
Profundidad de la junta (m)	Angulo entre panel (°)	Cierre de la junta (mm)	Profundidad de la junta (m)	Angulo entre panel (°)	Cierre de la junta (mm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.50	0.95	1.25	1.50	0.92	1.10
3.00	1.91	2.50	3.00	1.83	2.20
4.50	2.71	3.55	4.50	2.56	3.35
6.00	2.48	3.25	6.00	2.29	3.00
7.50	1.91	2.50	7.50	1.91	2.50
9.00	1.53	2.00	8.50	1.26	1.65
10.31	1.15	1.50			

Altura de muro 9-9.27 m			Altura de muro 8.-8.93 m		
Profundidad de la junta (m)	Angulo entre panel (°)	Cierre de la junta (mm)	Profundidad de la junta (m)	Angulo entre panel (°)	Cierre de la junta (mm)
1.66	1	1.00	1.76	0.76	1.00
2.40	1.15	1.50	2.32	0.95	1.25
3.16	2	2.00	3.25	1.26	1.65
3.90	1.72	2.25	3.76	1.34	1.75
4.69	2	2.50	4.80	1.72	2.25
5.40	2.18	2.85	5.81	2.06	2.70
6.16	1	1.50	6.26	1.53	2.00
6.92	0.76	1.00	6.62	1.15	1.50

Figura 3.19.- Tabla de distribución de desplazamientos relativos entre panel y cierre de la junta.

3.4.2 Resultado de medidas corregidas.

Los resultados del cerramiento y la corrección debido al giro del panel se muestran en la figura 3.20, donde se aprecia que las correcciones en la mayoría de los casos tienen una tendencia similar a los mínimos registrados.

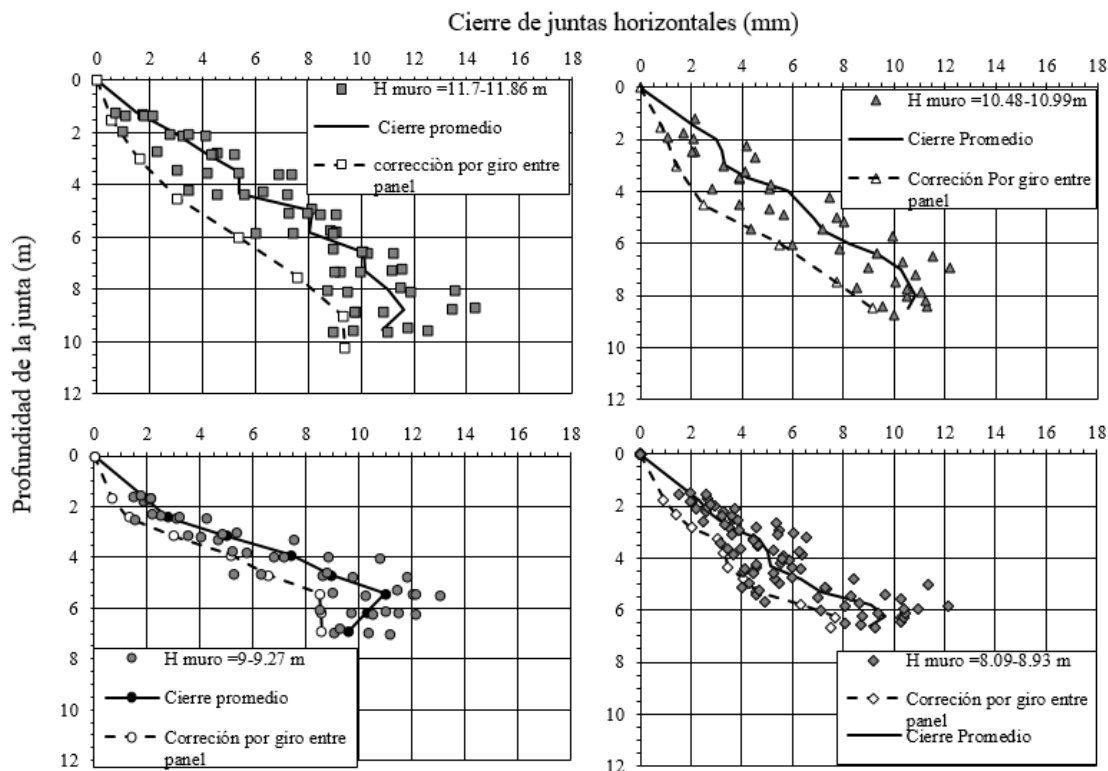


Figura 3.20.-Gráfico del ajuste del cierre promedio debido a los desplazamientos impuestos a los paneles de acuerdo a la alturas de muro.

3.4.3 Fuerzas sobre los apoyos.

En esta apartado, se determinan las fuerzas actuantes sobre los apoyos ubicados en las juntas horizontales, estas fuerzas son calculadas en función del cierre (aplastamiento del apoyo) medido en obra y en base a los ensayos a compresión realizados sobre tres muestras. Al utilizar dos apoyos por juntas, se aumenta el área de contacto, este incremento tiene relevancia en la representación gráfica en la relación fuerzas-desplazamiento.

El aumento del área de contacto implica una mayor capacidad de fuerza (F_j) del conjunto de pieza, pero sin variar el valor del desplazamiento correspondiente al límite elástico (δ_i), con lo que el desplazamiento para llegar a plastificación es el mismo (Figura 3.20).

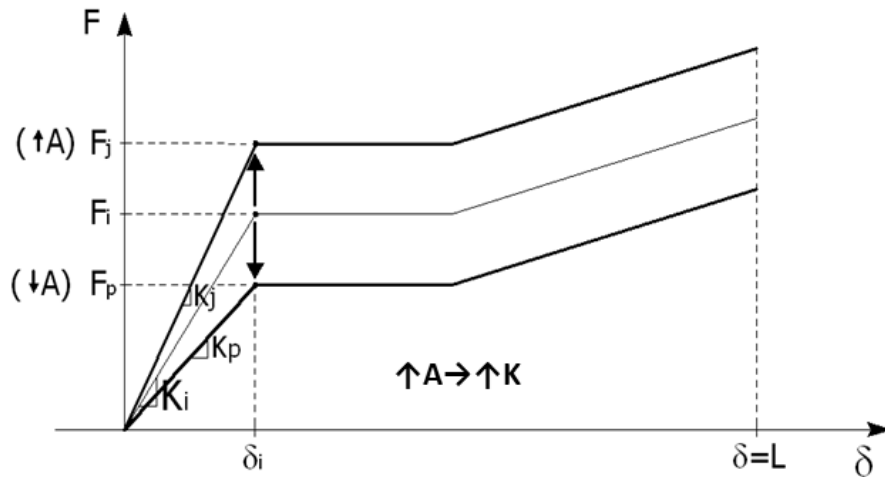


Figura 3.21.-Influencia del aumento de área en apoyos .

Al representar el comportamiento fuerza-desplazamiento del conjunto de apoyos aplicando los conceptos mencionados anteriormente sobre las tres muestras ensayadas, se obtiene la relación fuerza-desplazamiento (Figura 3.21), se aprecia un aumento del coeficiente de rigidez, logrando soportar el doble de fuerza necesaria para superar el límite elástico, sin embargo, el valor de desplazamiento correspondiente al límite elástico es igual al anterior con un solo apoyo. Este gráfico es de vital importancia ya que a partir de este concepto se determinan las fuerzas ejercidas en los apoyos ubicados en las juntas horizontales.

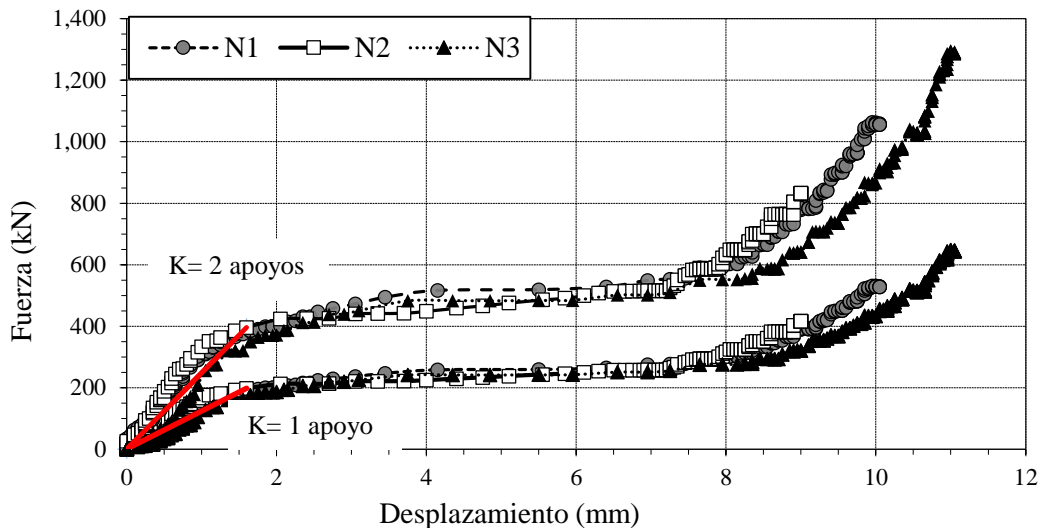


Figura 3.22.-Comportamiento a compresión, con dos apoyo tipo gofre, material polietileno de alta densidad (HDPE) (VSL,2008).

Utilizando la figura 3.22 que representa un ensayo a compresión simple del conjunto de apoyo, se determinan la fuerza que actúan sobre estos al conocer el cierre de la junta horizontal (compresión del apoyo) y trazando las pendientes correspondientes a las 3 fases características del apoyo, mediante la ecuación correspondiente a cada pendiente, se determina de forma directa la fuerza ejercida en el conjunto de los apoyos.

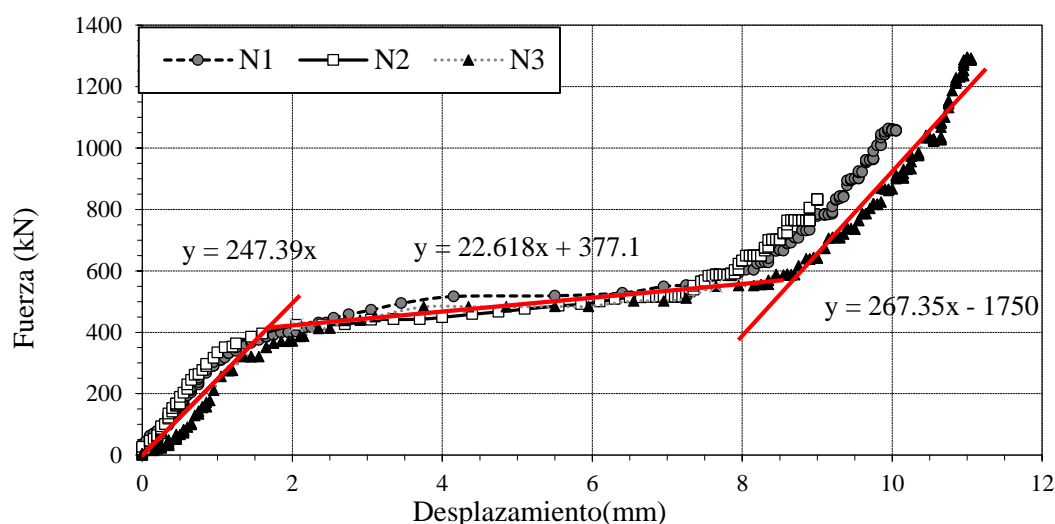


Figura 3.23.-Comportamiento a compresión de dos apoyos HDPE tipo gofre, pendiente del comportamiento triliteral, (VSL.2008).

Las fuerzas verticales que actúan sobre los en los apoyos se estiman de acuerdo a las pendientes obtenidas en la figura 3.22 y el cierre medido de cada junta, las fuerzas verticales determinadas resultaron ser superiores al peso propio del panel, alcanzando una fuerza máxima sobre los apoyos con un valor de 763 kN en la parte superior del primer panel y una fuerza mínima de 136 kN ubicada debajo del panel de coronación. (Figura 3.23).

En general, los resultados de las fuerzas verticales obtenidas para los distintos rangos de altura, muestran un comportamiento no lineal donde las fuerzas verticales aumentan a medida que la profundidad crece, se registró una fuerza vertical de 11 a 15 veces el peso propio del paramento en la parte interior del panel de coronación y de 10 a 9 veces el peso propio del paramento en la parte superior del primer panel colocado. Los resultados de las fuerzas verticales resultantes de las medidas instrumentadas se grafican en términos de factor de carga vertical (relación entre fuerza total actuante y el propio del panel) en función de la profundidad (Figura 3.24).

El factor de carga vertical en la parte superior del muro es mayor que en la parte inferior del muro, esto se debe a posibles cargas de tránsito al que está sometido el panel superior, al igual que deformaciones bajo cargas constante (fluencia del material) ya que las medidas realizadas en obra se tomaron siete años y medio después de la finalización de la misma y consecuente a estas deformaciones se obtiene un muy superior valor superior a 1 peso propio del panel (Figura 3.22).

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

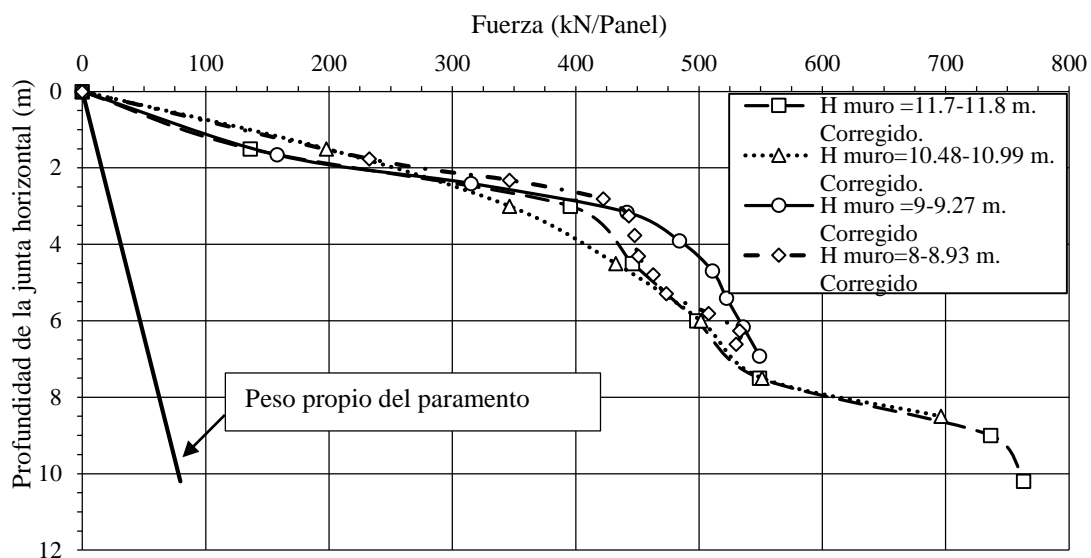


Figura 3.24 Resultados de fuerzas actuante sobre los apoyos en función de la profundidad.

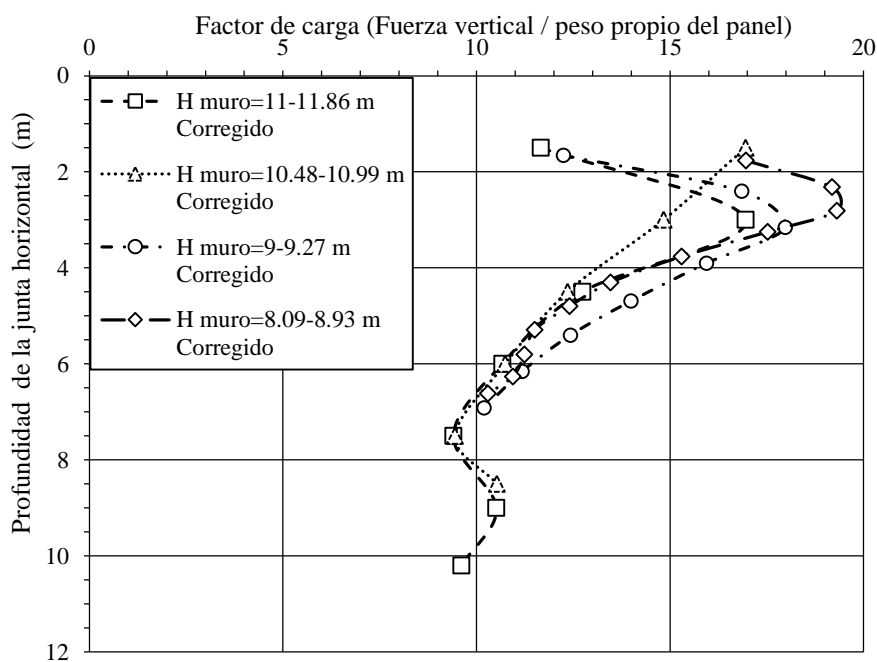


Figura 3.25.-Factor de carga vertical en función de la profundidad.

Capítulo 4: Modelo Numérico.

4.1 Introducción.

El modelamiento numérico ha proporcionado una herramienta importante para el análisis de los principales factores que influyen en el comportamiento de muros de suelo reforzado en condiciones operativas. Diversos programas computacionales basados en elementos finitos se han utilizado para realizar modelos numéricos intentando reproducir las mismas condiciones de las interacciones entre sus componentes, un ejemplo de esto (Puig, 2016) donde simularon el comportamiento del muro debidamente instrumentado en Minnow Creek de 16.7 m de alto con refuerzos inextensible de acero (Runsert et al., 2001), los resultados del modelo numérico muestran similitud de acuerdo al rango de medidas reportadas por . (Runser, 1999)

La contribución de los modelos numéricos validados mediante medidas instrumentadas es la de poder realizar análisis de sensibilidad que permita determinar la influencia de la integración entre elementos estructurales, elementos de suelo, y la rigidez del apoyo. Logrando cuantificar las cargas verticales transmitidas al panel debido a los asentamientos relativos entre el panel y el material de relleno.

En este capítulo se llevó a cabo un análisis utilizando un modelo numérico 2D de elementos finitos representando las mismas condiciones y propiedades de los elementos estructurales que posee la obra de estudio, cuyo objetivo es determinar cuáles parámetros tanto del suelo de relleno como el suelo de fundación reproducen mejor las cargas verticales al final de la construcción al compararlas con las medidas instrumentadas del muro.

El software de elementos finitos 2D PLAXIS V9.02 ha sido utilizado para realizar la simulación numérica de la construcción del muro de estudio, la figura 4.1 muestra la malla de elementos finitos (elementos de triángulos de 15 nodos para un total de 32743 nodos y 3381 elementos) y la geometría adoptada, el modelo se realizó en base al eje de simetría de la obra para un ancho medido desde el panel de 11 m. Se considera un muro con una altura (H)=12 m y una profundidad de empotramiento (D)=1.5 m. Se utilizaron refuerzos inextensibles tipo malla de acero con una longitud (L) de 0.61 veces la altura del muro. El revestimiento de muro se modeló como paneles rectangulares de 1.5 m de altura, 2.25 m de ancho y un espesor de 0.15 m. Las juntas horizontales se modelaron simulando dos apoyos entre panel con un espesor de 20 mm, la losa de nivelación posee un espesor de 0.15 m y un ancho mínimo recomendado de 0.35 m.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

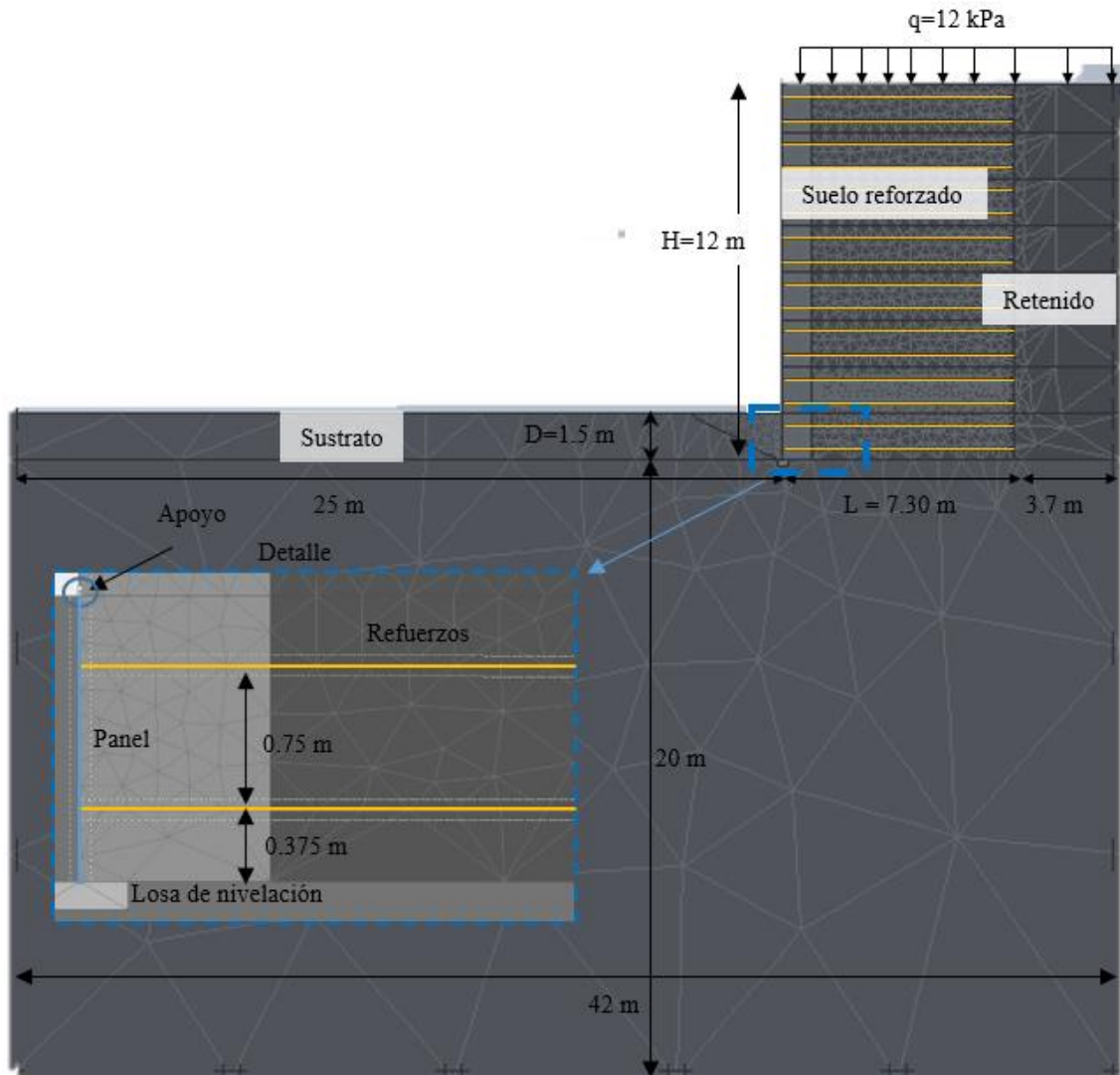


Figura 4.1 .-Mallado y dimensiones del modelo numérico 2D.

Las zonas de suelo se modelaron como material elástico lineal con el criterio de falla de Mohr-Coulomb, los valores de la rigidez del suelo de relleno se redujeron 50% 20% y 10% para la zona del suelo ubicada a 1 m de la parte posterior del revestimiento, para captar la influencia de la reducción de la energía de compactación cerca de la cara de la estructura.

Los paneles y las juntas horizontales (apoyos) se modelaron utilizando elementos viga tipo placa (plate) como un material elástico lineal. Estos se utilizan para modelar estructuras esbeltas, con una rigidez a flexión (EI) y una rigidez a esfuerzos normales (EA). Las placas pueden ser utilizadas para simular la presencia de muros o distintos tipos de revestimientos que se extiendan en la dirección Z. Las placas en el modelo de elementos finitos en dos dimensiones están constituidas por elementos viga (elementos unidimensionales) con tres grados de libertad por nodo; dos grados de libertad de traslación y un grado de libertad de rotación. Los elementos de viga se conectaron a través de contactos de bisagra con cero rigideces rotacionales, por lo tanto, las cargas verticales y horizontales pueden transmitirse en el contacto entre cada apoyo y los

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

paneles de concreto adyacentes, pero no el momento. Este enfoque permite la compresión vertical de las juntas de los paneles (apoyo) y la rotación en cada una.

Los elementos de refuerzo fueron modelados como elementos geomalla (Geogrid). Estos elementos solo pueden soportar fuerzas de tracción. Las geomallas se utilizan, por lo general, para modelar refuerzos de suelo, estas están compuestas de elementos unidimensionales con dos grados de libertad de translación en cada nodo. El parámetro necesario para definir estos elementos es la rigidez axial (EA). Se unieron dos filas horizontales de elementos de refuerzo a cada unidad de panel que coincide con la disposición en los planos de la obra de estudio (espacio vertical = 0.75 m)

El modelo fue desarrollado mediante un proceso constructivo incremental de abajo hacia arriba para simular la construcción.

En la parte superior del muro se asume una sobrecarga de tránsito pesado distribuida en lo ancho de todo el relleno de 12 kPa.

4.2 Propiedades de los materiales e interfaces.

Las propiedades en los materiales de los paneles de hormigón y de los apoyos, se resumen en la tabla 4.1, los elementos de viga de PLAXIS se utilizaron para modelar los paneles de hormigón y las juntas horizontales (apoyos). La rigidez axial equivalente de la junta horizontal para el conjunto de los apoyos se determina mediante la ecuación 4.1

$$EA = E(\text{apoyo}) A(\text{apoyo}) \frac{n}{L_p} \quad (\text{Ec-4.1})$$

Donde:

E: Módulo elástico del apoyo.

A: Es el área perimetral (de un solo apoyo).

n: Número de apoyos por junta.

L_p: Ancho del panel.

El módulo de elasticidad del apoyo (HDPE) se tomó a una deformación del 8% utilizando los datos de las tres muestras (N1, N2, N3) ensayadas a compresión en el laboratorio (Figura 3.6), los valores de la rigidez axial indicados en la tabla 4.1 representan dos apoyos por junta. Para mantener el modelado numérico simple, no se consideró en el estudio el potencial de reblandecimiento ni endurecimiento por deformación del material de apoyo.

Tabla 4.1-Propiedades del Apoyo (HDPE) y panel utilizados en modelo.

Parámetros	Símbolos	Panel de concreto	Apoyo HDPE
Módulo de elasticidad	E	3.5x 10 ⁴ MN/m	127 MPa
Rigidez Axial	EA	5250 MN/m	2.030 MN/m
Rigidez flexión	EI	9843 kNm ² /m	0.65 kNm ² /m
Módulo de Poisson	ν	0.2	0.4
Peso	ω	3.52 kN/m/m	0.01
Modelo constitutivo	-	Lineal elástico	Lineal elástico
Tipo de elemento	-	(plate)	(plate)

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

Las propiedades del refuerzo se enumeran en la tabla 4.2, la geomalla de PLAXIS se utilizó para modelar los elementos de refuerzo como láminas continuas que poseen únicamente rigidez axial y pueden transmitir la carga al suelo circundante a través del corte de la interfaz. Se modelaron refuerzos tipo malla de acero que poseen dos barras de 8 mm de diámetro por unidad de malla. La rigidez axial equivalente se calcula utilizando la ecuación 4.1, en la tabla 4.2 los valores de la rigidez varían debido a que el número de mallas en una fila aumenta con la profundidad (aumento del número de barras de refuerzo).

La longitud del refuerzo en el modelo es constante a lo alto de todo el muro con un valor de 7.30 m, para una relación $L/H = 0.61$.

Tabla 4.2-Propiedades del refuerzo.

Altura del refuerzo desde la parte superior de la losa (m)	Elástico lineal rigidez axial (EA) (MN/m)
0.375	56.27
1.125	56.27
1.89	46.89
2.645	46.89
3.415	46.89
4.165	37.51
4.954	37.51
5.687	37.51
6.45	28.13
7.2	28.13
7.975	28.13
8.725	28.13
9.493	18.76
10.245	18.76
11.015	18.76
11.765	18.76

En este trabajo de investigación se consideraron cuatro suelos de relleno dos suelos de sustrato con propiedades distintas. Las propiedades asumidas para el suelo y el sustrato se resumen en la tabla 4.3. Los parámetros del suelo de fundación se toman de acuerdo a la campaña de sondeos y ensayos realizados comentado en el apartado 3.2.1, en cuanto a los parámetros del suelo de relleno se propusieron distintos valores de ángulo de fricción, dilatancia y módulo de rigidez, de manera tal de reproducir las cargas verticales reportadas mediante las medidas del cierre de las juntas horizontales en el capítulo 3.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

Tabla 4.3-Propiedades del suelo de relleno.

Material	Parámetros	Símbolo	Valor	
Suelo de relleno	Peso Unitario	γ (kN/m ³)	20.5	
	Cohesión	c' (kPa)	5	
	Módulo de Poisson	ν	0.3	
	Angulo de fricción	ϕ (°)	34	
			38	
			43	
	Angulo de dilatación	Ψ (°)	4	
			8	
			15	
Sustrato	Módulo de Young	E (MPa)	<1m desde el panel	>1m desde el panel
			10	20
			5	10
			7	10
			9	10
	Peso Unitario	γ (kN/m ³)	20	
	Cohesión	c' (kPa)	10	
	Módulo de Poisson	ν	0.35	
	Angulo de fricción	ϕ (°)	35	
	Angulo de dilatación	Ψ (°)	5	
	Módulo de Young	E (MPa)	30	
			17	

Los elementos de interfaz de PLAXIS se utilizaron para modelar la resistencia y la rigidez entre el suelo de relleno y los elementos estructurales (refuerzo y paramento). Estos elementos incluyen un factor de reducción de interfaz denominado coeficiente de fricción (R). La interfaz para la interacción entre el relleno y el paramento se le asignó un valor $R = (\tan \delta / \tan \phi)$, donde δ es el ángulo de fricción entre hormigón y ϕ es el ángulo de fricción del suelo de relleno. La interfaz suelo-refuerzo fue modelada suponiendo un comportamiento perfectamente adherido. Esto es consistente con las mediciones realizadas en ensayos de tracción en barras de acero rugoso en suelos granulares compactados (Bathurst et al., 2011).

Los elementos de interfaz para la interacción entre el suelo de relleno y el paramento fueron calibrados tal manera que sean reproducidas las cargas verticales reportadas en el muro de estudio, para esto se implementaron distintos coeficientes de interfaz variando por igual los parámetros del suelo de relleno y sustrato. Los coeficientes de interfaz modelados en el trabajo de investigación son los siguientes, $R = 0.6, 0.8$ y 0.85 . (Figura 4.1).

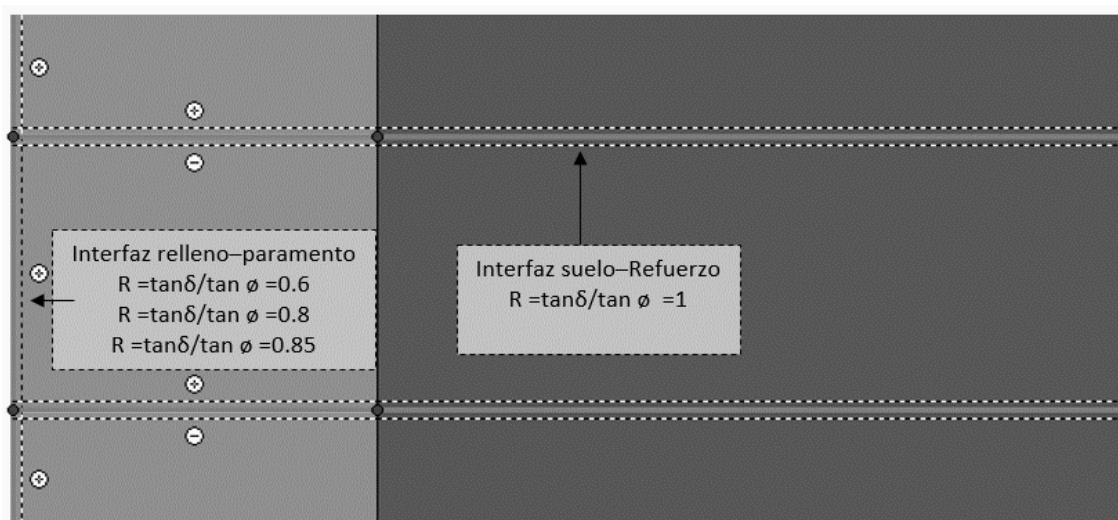


Figura 4.2.-Implementación de las Interfaces en el modelo.

4.3 Resultados.

En este apartado se muestran los resultados de las fuerzas verticales que actúan en las juntas horizontales de acuerdo a las distintas combinaciones de parámetros del suelo de relleno y el sustrato. Se analizan tres tipos de coeficiente de fricción para la interfaz entre el paramento-relleno. Luego, se analiza la influencia de la diferencia de rigidez asumida para la columna de suelo menos compactada debido al uso de equipos de compactación más ligeros la cual se recomienda practicar a 1 metro de distancia del paramento y, por último, la influencia del ancho de la losa de nivelación sobre las fuerzas verticales en las juntas horizontales.

4.3.1 Ajuste del modelo.

En esta sección se realiza un análisis de sensibilidad para determinar las fuerzas que actúan al final de la construcción sobre las juntas horizontales, para las distintas combinaciones de parámetros del suelo de relleno y sustrato. La relación entre el ángulo de rozamiento interno del material de relleno y la fricción del paramento corresponde a los valores típicos entre hormigón y terreno (δ) = $\frac{2}{3}\phi$ = (0.67ϕ) resultando un valor de $R=0.6$ (Figura 4.3), por otro lado se asumieron dos relaciones superiores a los valores típicos del ángulo de fricción entre el hormigón y el terreno, las relaciones asumidas fueron 0.80ϕ y 0.85ϕ (Figura 4.4, Figura 4.5 respectivamente) correspondiente a un coeficiente de interfaz paramento-relleno $R=0.8$ y 0.85 .

En general, los resultados de los modelos muestran un aumento de la fuerza vertical al incrementar el ángulo de fricción interna del suelo de relleno, este incremento de fuerza vertical es más notorio en la parte inferior del muro y decrece al aumentar las alturas de la junta horizontal.

Los resultados de las simulaciones numéricas para un valor de $R=0.6$ de la interfaz relleno-paramento y distintas variaciones del suelo de relleno se muestran en la figura 4.3 donde se observa que al aumentar el ángulo de rozamiento interno del material del relleno ϕ se genera un incremento de las fuerzas verticales en las juntas horizontales, este incremento es mayor en la primera junta del muro (ubicada a 1.5 m de altura) y decrece a medida que la profundidad de la junta disminuye (medida desde la corona del muro). La influencia del aumento de ϕ al disminuir la rigidez del material de relleno es más notorio, las fuerzas verticales registradas son mayores

que las obtenidas en comparación con un material más rígido, como se observa en el lateral izquierdo en la figura 4.3 donde la influencia al variar el ángulo de rozamiento de 34° a 43° en un material de relleno con una rigidez de 20 MPa se aprecia un aumento de la fuerzas en la primera junta de 56 kN/Panel (gráfico lateral izquierdo superior), sin embargo, al disminuir la rigidez del suelo de relleno un 50% para un valor de 10 MPa (gráfico lateral izquierdo inferior) y al aumentar el ángulo de fricción de 34° a 43° , la fuerza vertical incrementa 63 kN/Panel. Por otro lado, al disminuir la rigidez del sustrato las fuerzas verticales disminuyen.

En la figura 4.4 se observan los resultados de las simulaciones numéricas imponiendo un valor $R=0.8$ a la interfaz relleno-paramento, las fuerzas obtenidas son mayores en comparación con los resultados de la gráfica 4.3 para un valor $R=0.6$, al comparar las fuerzas verticales debido al aumento de la interfaz, estas incrementan desde 91 kN/Panel a 108 kN/Panel para un ángulo de rozamiento interno 34° y 45° respectivamente.

Los resultados de los modelos imponiendo un valor $R=0.85$ a la interfaz relleno-paramento (figura 4.5), como he de esperar, las fuerzas verticales que actúan sobre las juntas horizontales son mayores, estas aumentan de 90 kN/Panel a 111 kN/panel en comparación con el modelo para un valor de $R=0.6$. La mayor fuerza vertical registrada obtuvo un valor 686.2 kN/panel.

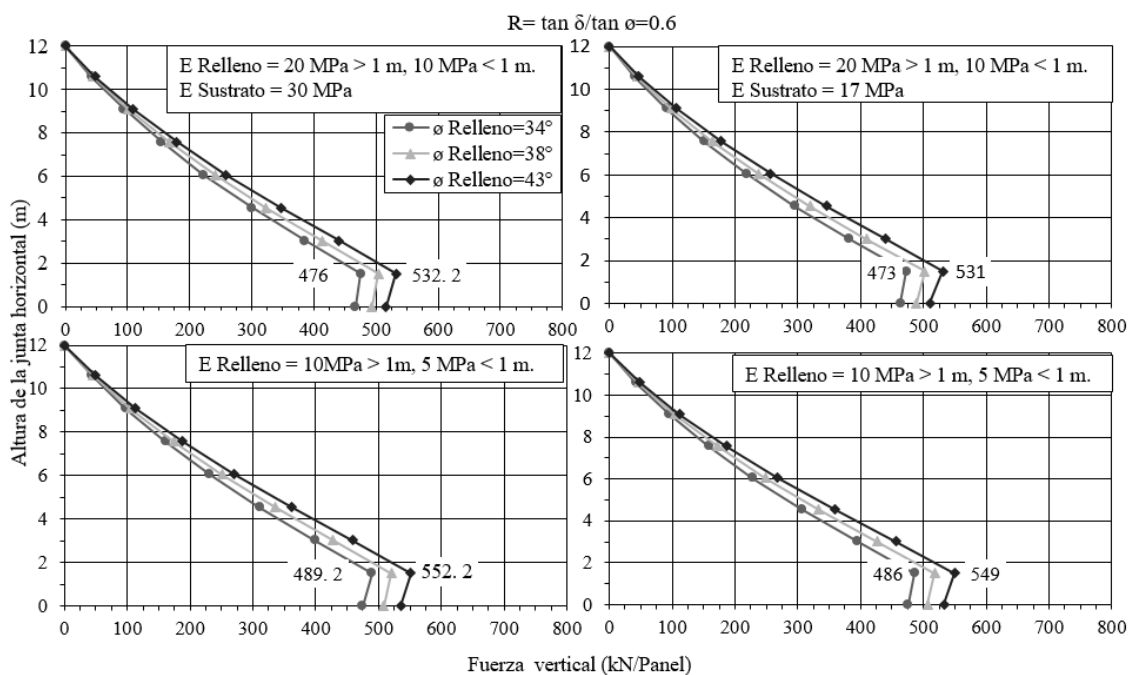


Figura 4.3.-Fuerza vertical sobre las juntas horizontales en función de la altura del muro para distintos ángulos de fricción interna del material de relleno, asumiendo una interfaz relleno-paramento $R=0.6$.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

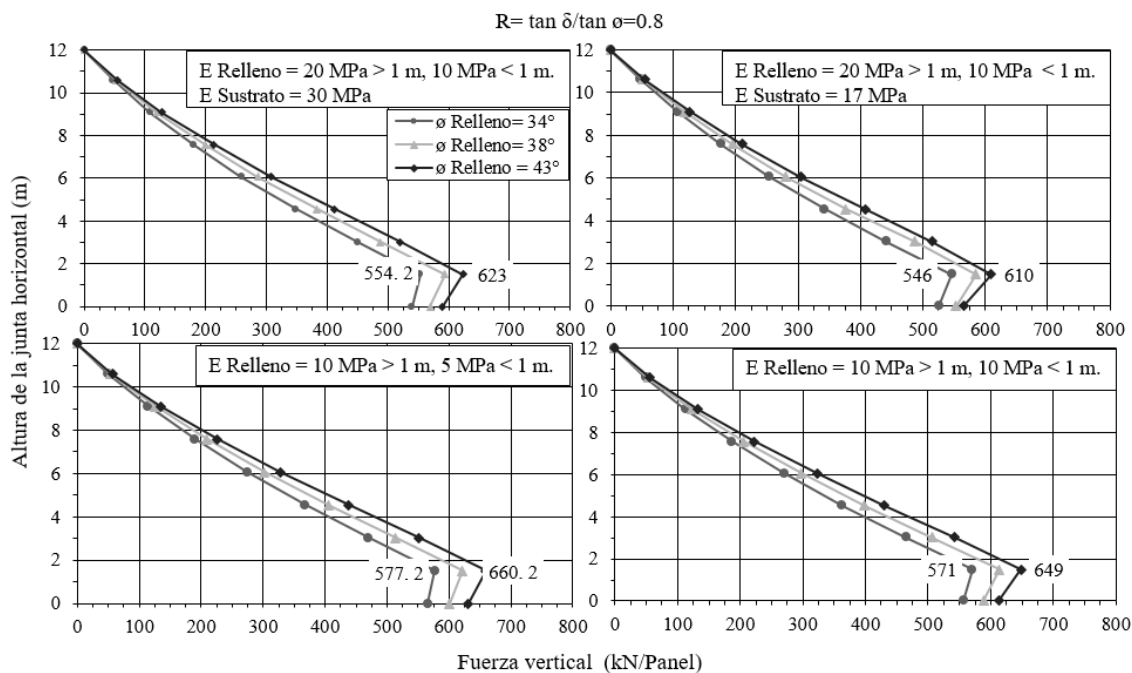


Figura 4.4.- Fuerza vertical sobre las juntas horizontales en función de la altura del muro para distintos ángulos de fricción interna del material de relleno, asumiendo una interfaz relleno-paramento $R=0.8$.

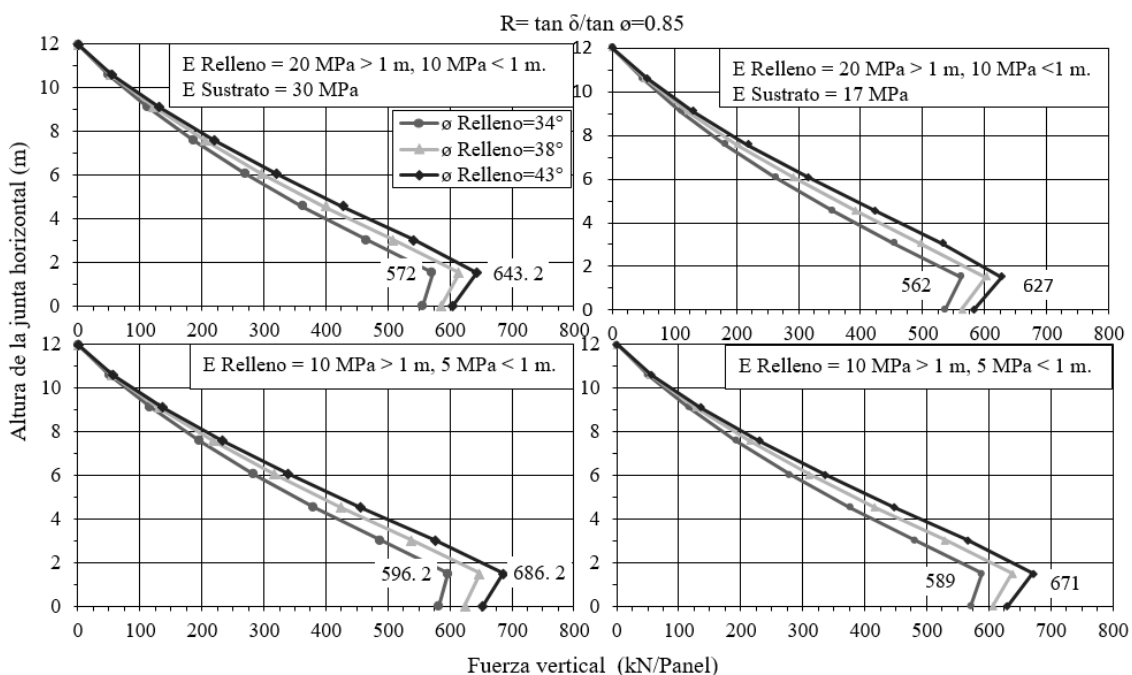


Figura 4.5.- Fuerza vertical sobre las juntas horizontales en función de la altura del muro para distintos ángulos de fricción interna del material de relleno, asumiendo una interfaz suelo-paramento $R = 0.85$

En general, el aumento del coeficiente de fricción tiene un mayor efecto sobre las fuerzas verticales en suelos de relleno menos rígidos. La combinación de rigidez y parámetros del suelo que mejor reproduce la fuerza vertical en comparación con las medidas instrumentadas en el capítulo 3 para un muro de similar altura, se muestra en la figura 4.6.

Al comparar el valor del ángulo de rozamiento interno del suelo de relleno en el modelo (43°) y el obtenido de los ensayos de laboratorio del acopio (34°), este valor se justifica ya que el ángulo de rozamiento interno en deformación plana puede ser de 1.12 a 1.25 veces mayor que el obtenido en el laboratorio ($\phi_{\text{def plana}} = 1.12-1.25 \phi_{\text{lab}} = 38^\circ - 43^\circ$) (Kulhawy & Mayne, 1990).

De acuerdo con Puig, 2016 las fuerzas debido a la interacción entre el relleno y el paramento para un valor de $R=0.85$ representan el 80-85% de la fuerza vertical total, la fuerza axial transmitida por el refuerzo y el peso propio representan un valor del 5% y 15% respectivamente.

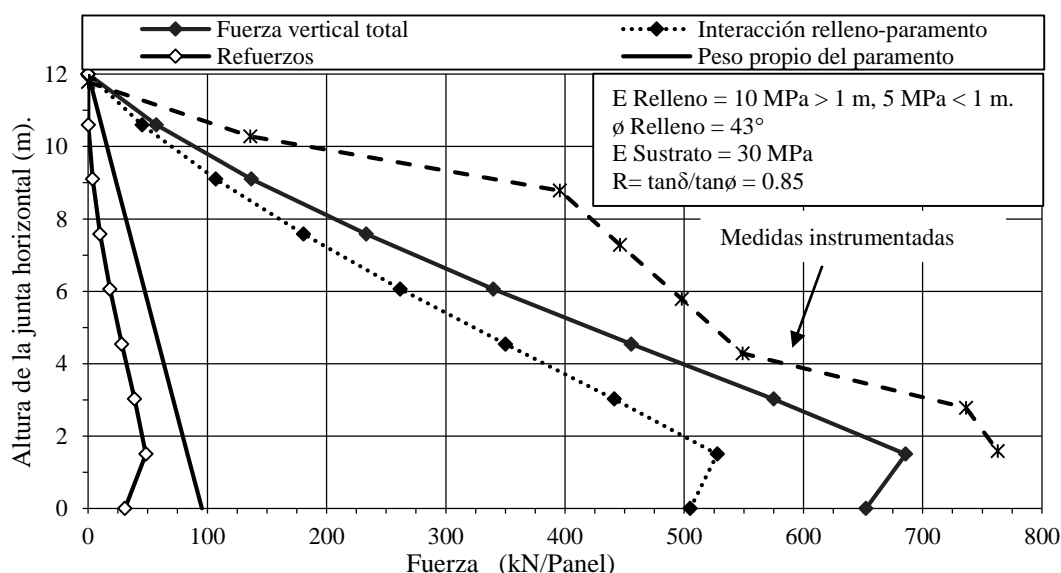


Figura 4.6.- Fuerza vertical sobre las juntas horizontales en comparación con los resultados de las medidas instrumentadas.

En base a los parámetros del suelo de relleno y del sustrato utilizados en el modelo de la figura 4.6, se analiza la influencia de distintas relaciones de la rigidez del suelo de relleno a un metro del panel debido al uso de compactación más ligera en esta zona, por otro lado, también se muestra la influencia del ancho de la losa de nivelación sobre las fuerzas verticales que actúan sobre las juntas horizontales.

4.3.2 Influencia de la rigidez asumida en el suelo menos compactado.

Al utilizar equipos de compactación más ligeros a 1m de la parte posterior del revestimiento, los valores de la rigidez del suelo de relleno se asumieron a un 50% 70% y 90% del suelo de relleno a más de 1m del paramento para captar la influencia de distintas reducciones de rigidez debido a la energía de compactación cerca de la cara de la estructura.

Al disminuir la diferencia de la rigidez del suelo a 1m de la parte posterior del paramento asumiendo una compactación más homogénea, en la figura 4.7, se aprecia un incremento de las

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

fuerzas verticales al aumentar la rigidez de la columna de suelo menos rígido de un 50% al 90 %, la fuerza total vertical aumenta 1.10 veces en la parte superior del primer panel.

La diferencia de compactación para el material menos compactado que mejor se aproxima a las medidas instrumentadas corresponde a un valor de $E_{\text{relleno}} < 1\text{m} = 90\%$.

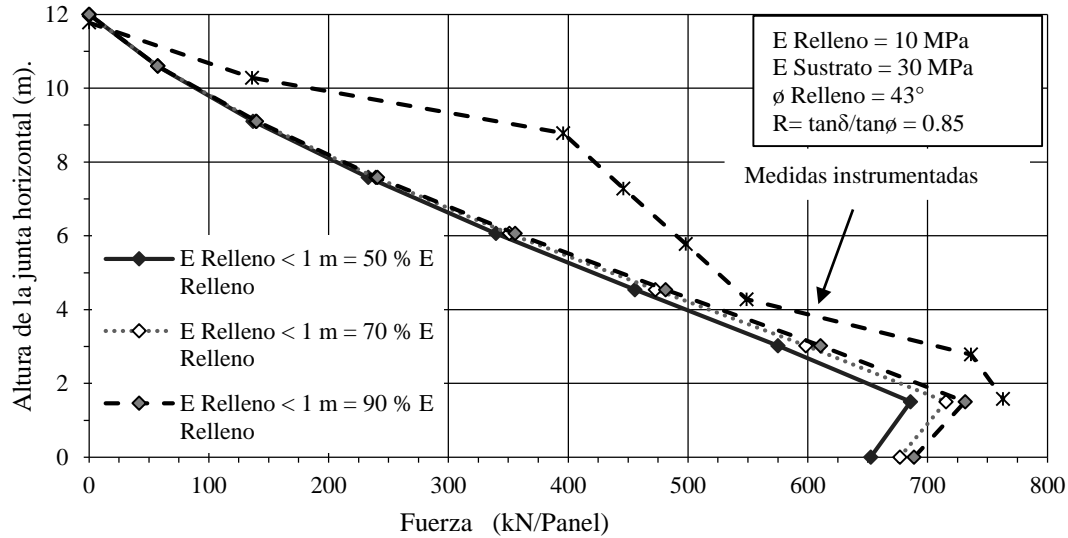


Figura 4.7.-Influencia de la reducción asumida en la rigidez para la columna de suelo menos compactada sobre la fuerza vertical en las juntas horizontales.

4.3.3 Influencia del ancho de la losa de nivelación.

En esta sección se analiza la influencia al variar el ancho (B) de la losa de nivelación. Los resultados del modelo muestran que al aumentar 15 cm el ancho de la losa se genera un incremento de 1.13 veces la fuerza vertical anterior y un aumento menor en la primera junta horizontal. Este último modelo es el que mejor se ajusta a las fuerzas verticales de las medidas instrumentadas.

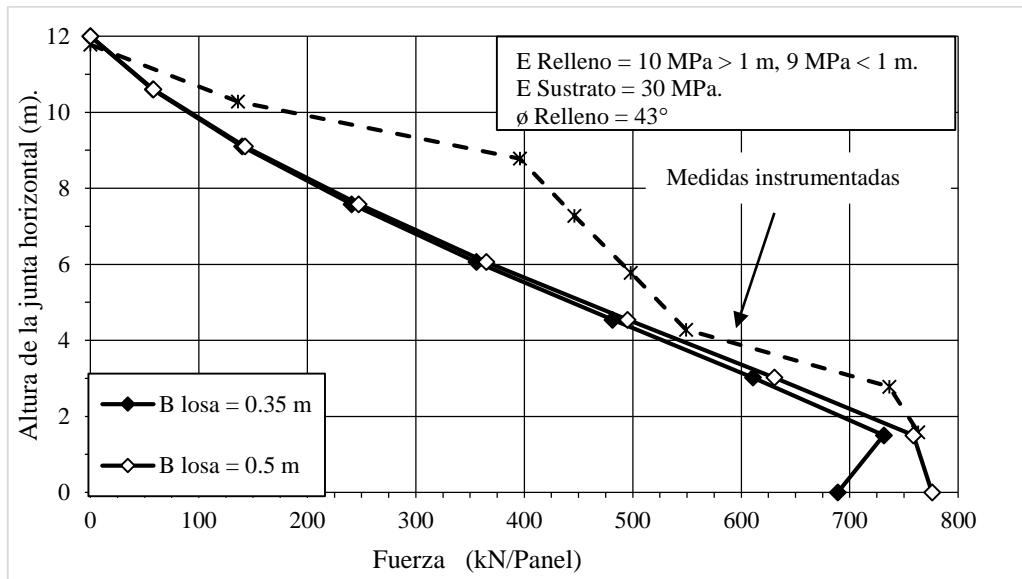


Figura 4.8.-Influencia del ancho de la losa de nivelación sobre las fuerzas verticales en las juntas horizontales.

4.3.4 Fuerzas verticales sobre las juntas horizontales.

En el modelo final las fuerzas verticales debido a la interacción relleno-paramento representan el 80% de la fuerza vertical total al final de la construcción, la fuerza axial transmitida por los refuerzos y el peso propio del panel equivalen al 15% y 5% respectivamente.

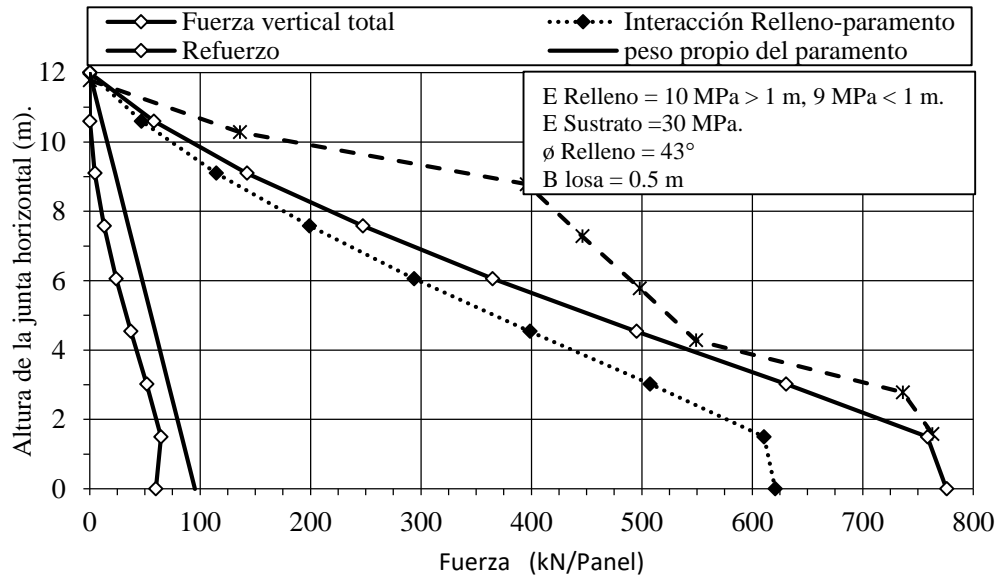


Figura 4.9.-Resultado del modelo final ,fuerzas verticales sobre las juntas horizontales en función de la de la profundidad de la junta.

La distribución del factor de carga vertical obtenido del modelo, arroja un valor similar al determinado mediante las medidas instrumentadas en la parte superior del primer panel ubicado a una altura de 1.5m como se observa en la figura 4.10, sin embargo, a medida que la altura del muro aumenta, los factores de carga vertical no muestran un aumento como se observa en las medidas instrumentadas. La no similitud entre el modelo numérico y las medidas instrumentadas se debe a diferentes factores: el modelado del apoyo (junta horizontal) se computó como un material elástico lineal sin embargo el comportamiento del apoyo al superar el módulo de rigidez entra en plastificación (tramo de fluencia) en el cual el apoyo se deforma bajo una carga constante, a medida que pasa el tiempo, las piezas de apoyo sufren desgaste debido a los rayos ultra violeta los cuales pueden disminuir la resistencia del material al aumentar el cierre de las juntas.

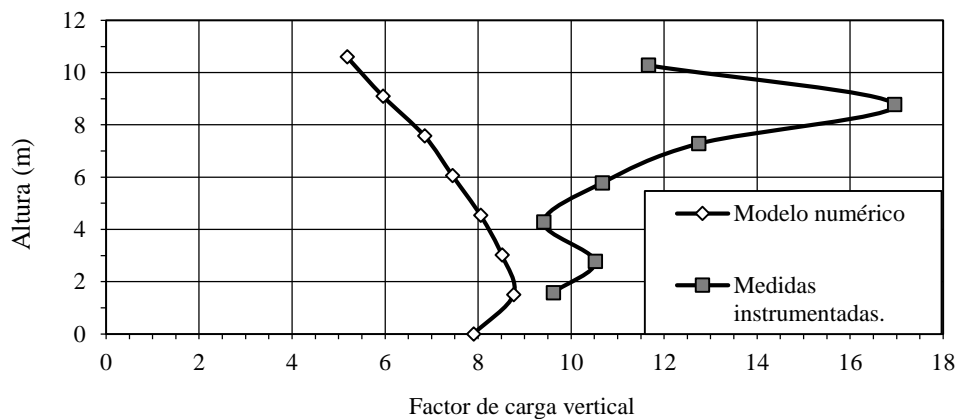


Figura 4.10.-Factor de carga vertical en las juntas horizontales en función de la altura del muro.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

Los desplazamientos horizontales en los paneles se muestran en la figura 4.11, donde se le otorga un valor negativo cuando los desplazamientos están hacia el exterior del relleno y un valor positivo hacia el interior del relleno, donde el desplazamiento máximo hacia el exterior se registró en la parte superior del segundo panel a una altura de 3 m y un desplazamiento máximo de 5.30cm en la corona del muro girando hacia el interior del relleno.

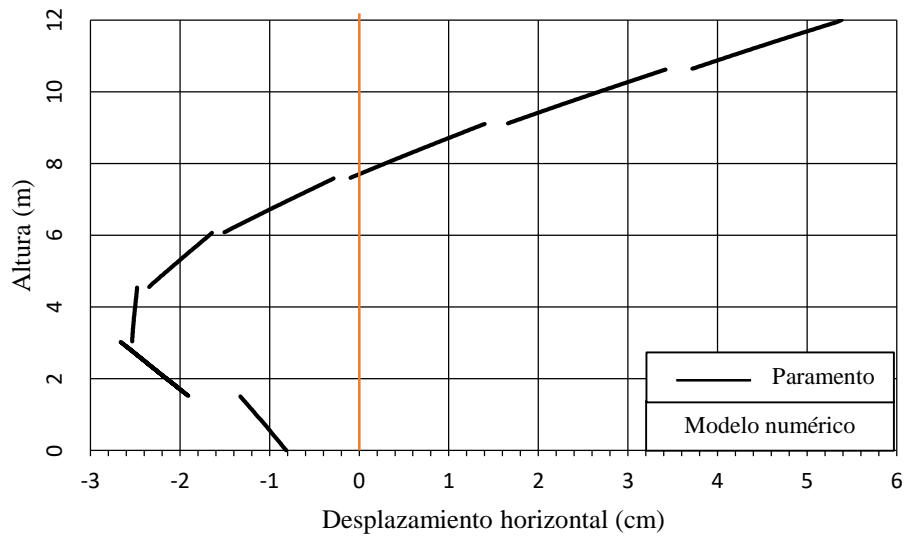


Figura 4.11.-Perfil vertical del muro al final de la construcción de acuerdo al modelo.

Capítulo 5: Conclusiones y futuras líneas de investigación.

En el capítulo presente, se realizan las conclusiones del trabajo de investigación en base a los resultados obtenidos del cierre de las juntas horizontales medidas in-situ y los modelos numéricos. El trabajo realizado en esta investigación sobre el cerramiento de las juntas horizontales ha permitido generar una amplia base de datos experimentales sobre las fuerzas verticales que actúan en la fachada del muro de suelo reforzado analizado.

Las medidas del cierre de las juntas horizontales para profundidades similares, muestran una variación de 5 mm, estas diferencias están influenciadas por el cierre en la fachada del paramento debido a los desplazamientos horizontales (giros) entre las unidades del panel. Estos desplazamientos están relacionados a los efectos generados por el proceso constructivo. Los resultados muestran que independientemente de la altura del muro, la fuerza vertical transmitida a los apoyos en función de la profundidad de la junta horizontal no varía de manera significativa.

Las cargas verticales reportadas en el trabajo de investigación obtenidas mediante el cerramiento de las juntas horizontales, resultaron ser mayores al peso propio del paramento. El factor de carga vertical (relación entre la fuerza vertical y el peso propio del paramento) obtuvo un valor de 9 en la parte inferior del muro de estudio. Sin embargo, en la parte superior el factor de carga vertical es mayor debido a sobrecargas cíclicas de tránsito a lo largo del tiempo, y desgaste del apoyo por los rayos ultra violeta.

En el modelo numérico se muestra la influencia de la interacción entre el paramento y el relleno utilizando tres valores distintos del coeficiente de fricción para la interfaz relleno-paramento. La influencia al aumentar el coeficiente de fricción es mayor a medida que la profundidad de la junta aumenta, el coeficiente de fricción que mejor se ajustó a las medidas instrumentadas fue de 0.85. Este valor está 1.26 veces por encima del valor típico asumido para un ángulo de rozamiento entre hormigón y suelo de $\delta=0.67\phi$. De igual manera, la influencia del ángulo de rozamiento aumenta con la profundidad de las juntas y las fuerzas verticales son mayores al aumentar el ángulo de fricción en un suelo de relleno menos rígido. El ángulo de fricción de 43° es el que mejor se ajusta a las medidas instrumentadas. Este valor es coherente, ya que el ángulo de rozamiento interno en deformación plana puede ser 1.12 a 1.25 veces mayor que el obtenido en el laboratorio ($\phi_{\text{def plana}} = 1.12-1.25 \phi_{\text{lab}} = 38^\circ-43^\circ$).

La combinación de la rigidez entre el relleno y el sustrato que mejor se ajustó a las medidas instrumentadas resultó ser $E(\text{relleno}) = 10 \text{ MPa}$ y $E(\text{sustrato}) = 30 \text{ MPa}$. Comprobando así, que al disminuir la rigidez del sustrato sobre las fuerzas verticales muestran una disminución.

El efecto al variar la rigidez del suelo menos compactado, tiene un mayor impacto en la parte superior del primer paramento, se demostró que, al asumir de la rigidez más homogénea del suelo menos compactado las fuerzas verticales aumentan hasta 1.04-1.07. Al aumentar el ancho de la losa de nivelación se registra un incremento de las fuerzas verticales en el pie del muro hasta la parte superior del primer panel.

Las distribuciones de fuerzas que aporta cada interacción de los componentes del muro de suelo reforzado de acuerdo al modelo numérico resulta ser: la fuerza vertical debido a la interacción entre el relleno-paramento representan el 80%, la fuerza axial transmitida por el refuerzo y el peso propio representan un valor del 5% y 15% respectivamente del valor de la fuerza vertical.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

El modelo numérico muestra un ajuste razonable en comparación con las medidas instrumentadas, al comparar el factor de carga vertical muestran que para la primera junta horizontal ubicada a 1.5 m de altura, el factor de carga ronda entre los 9-10.

Como futura línea de investigación se propone realizar un modelo numérico de elementos finitos en tres dimensiones (PLAXIS 3D), modelando una estructura de muro doble con un relleno reforzado en ambos extremos y una porción intermedia sin refuerzo con la finalidad de contrastar los resultados obtenidos con las medidas instrumentadas.

Bibliografías

- AASHTO, (2012). LRFD Bridge Design Specifications (6th edition). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC,USA.
- Allen, T., Christopher, B., Elias, V., & DeMaggio, J., (2001). Development of the simplified method for internal stability. Report WA-RD 513.1 July2001, Washington State Department of Transportation, Olympia, WA,USA.
- Anderson, P.L, & Brabant, K., (2006). Increased use of MSE abutments. International Bridge Conference, IBC-05-10, Pittsburgh, PA,USA.
- Bastick, M., Schlosser, F., Segrestin, P., Amar, S., & Canepa, Y.,(1993). Experimental reinforced earth structure of Bourron Marlotte: Slender wall and abutment test. Reinforcement des sols: Experimentations en Vraie Grandeur des Annees 80. Presses de L'école Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, France, pp.201-228.
- Bathurst, R.J., Huang, B., & Allen, T.M., (2011). Load and resistance factor design (LRFD) calibration for steel grid reinforced soil walls. Georisk, 5 (3-4): pp.2018-228
- Bathurst, R.J, Nernheim, A., & Allen, T.M., (2008). Comparison of measured and predicted loads using the Coherent Gravity Method for steel soil walls. Ground Improvement, 161 (3): pp.113-120.
- Berg, R.R., Christopher, B.R, & Samtani, N.C., (2009). Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes, Vol. I (FHWA NHI-10-024) and Vol.II (FHWA NHI-10-025),Nathional Highway Institute, Federal Highway Adminitration.U.S. Department of Transportation, Washington, DC, USA.
- Bowles, J.E., (1996). Foundation Analysis and Design. Fifth edition. McGraw-Hill. New York, NY, USA.
- Chida, S, & Nakagaki, M., (1979). Test and experiment on a full-scale model of reinforced earth wall. Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement, Paris, France, Vol II, pp. 533-538.
- Christopher, B.R., Bonczkiewicz, C., & Holtz, R.D., (1994). Design, construction and monitoring of full scale test of reinforced soil walls and slopes. Recent case histories of permanent geosynthetic-reinforced soil retaining walls, F. Tatsuoka & D. Leshchinsky, eds, Balkema, Rotterdam, ISBN 90-5410-358-2, pp.45-60.
- Jara Mori, G., (2010). Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos al diseño de estructuras de contención de tierras y su interacción con el terreno, para su empleo en obras de infraestructura viaria. Tesis doctoral. Departamento de Ingenieria y Morfología del Terreno, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Kulhawy, F.H, & Mayne, P.W., (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design. Report EL-6800, Electric Power Research Institute (EPRI). Palo alto, California, 306p.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.

Neely, W.J., (2005). Calculated and measured axial loads on bearing pads in MSE retaining walls . Presented at 2005 Western Bridge Engineer's Seminar, Session, 6C, Portland, Oregon, USA, September. 26-28.

Neely, W.J., & Tan, S.L. ., (2010). Effects of second order design factors on the behaviour of MSE walls. Earth Retention Conference 3. Earth Retaining Structures Committee of the Geo-institute of ASCE. Geotechnical Special Publications(GSP) no. 208. proceedings of the 2010 Earth Retention Conference held in Bellevue, WA, August 1-4, pp.522-530.

Puig Damians, I., (2016). Mechanical Performance and sustainability assessment of reinforced soil walls. Doctoral thesis. Department of Civil Engineering and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya , Barcelona, Spain.

Runser, D.J (1999). Instrumentation and experimental evaluation of a 17 m tall reinforced earth retaining wall. M.S. Thesis, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 289p.

Runser, D.J, Fox, P.J., & Bourdeau, P.L., (2001). Field performance of a 17 m-high reinforced soil retaining wall. Geosynthetics International,8 (5): 367-391.

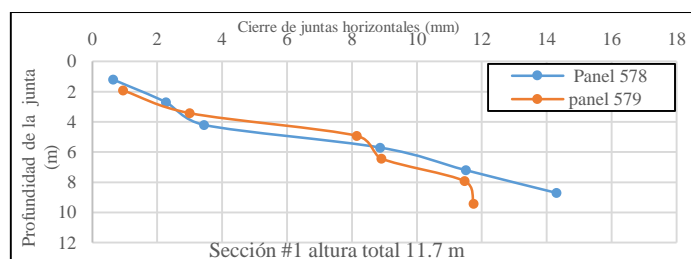
Valero, R.F., (2002). Criterios para el proyecto de estructuras de Suelo Reforzado. Informes de la construcción, pp. 29-41.

Vidal, H., (1966). La Terre Armée, un Matériau Nouveauf Pour les Travaux Publics. Annales de l'I.T.B.T.P., Paris, France, 223/224: 887-936.

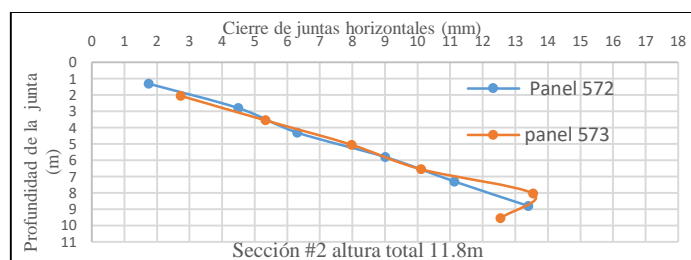
VSL. (2008). Ensayos de compresion simple de calas. HDPE tipo Gofre, CTT .Stronghold.

Anexos :Tablas y gráficas del cierre en las juntas horizontales.

Sección No. 1										
Junta No.	z (m)	Columna No. 578				z (m)	Columna No. 579			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación media	Cierre
7	10.21									
6	8.71	5.30	2.10	3.70	14.30	9.43	6.00	6.50	6.25	11.75
5	7.21	6.08	6.89	6.49	11.52	7.93	6.05	7.00	6.53	11.48
4	5.71	10.05	8.20	9.13	8.88	6.43	8.27	9.92	9.10	8.91
3	4.21	15.40	13.70	14.55	3.45	4.93	10.05	9.65	9.85	8.15
2	2.71	15.70	15.76	15.73	2.27	3.43	15.17	14.82	15.00	3.01
1	1.21	17.21	17.50	17.36	0.65	1.93	17.30	16.80	17.05	0.95

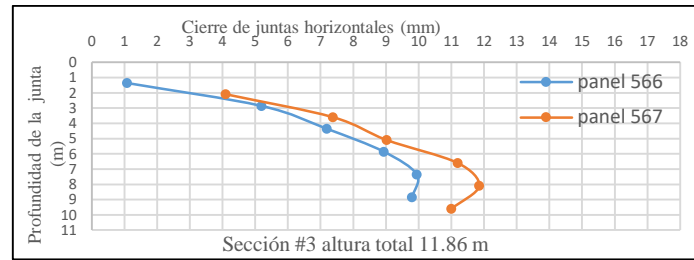


Sección No.2										
Junta No.	z (m)	Columna No. 572				z (m)	Columna No. 573			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Promedio	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Promedio	Cierre
7	10.31									
6	8.81	6.00	3.20	4.60	13.40	9.55	7.00	3.90	5.45	12.55
5	7.31	7.43	6.30	6.87	11.14	8.05	4.40	4.50	4.45	13.55
4	5.81	8.61	9.37	8.99	9.01	6.55	8.28	7.50	7.89	10.11
3	4.31	11.10	12.28	11.69	6.31	5.05	9.19	10.85	10.02	7.98
2	2.81	14.20	12.80	13.50	4.50	3.55	11.10	14.23	12.67	5.34
1	1.31	17.21	15.30	16.26	1.75	2.05	16.53	14.00	15.27	2.74

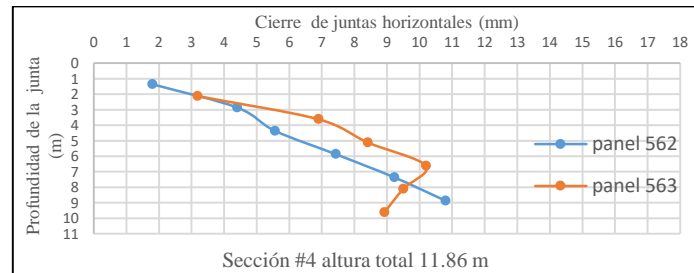


Sección No. 3										
Junta No.	z (m)	Columna No. 566				z (m)	Columna No. 567			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	promedio	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	promedio	Cierre
7	10.36									
6	8.86	8.00	8.40	8.20	9.80	9.6	9.25	5.18	7.22	10.785
5	7.36	8.28	7.83	8.06	9.95	8.1	6.00	6.30	6.15	11.85
4	5.86	8.89	9.25	9.07	8.93	6.6	6.08	7.53	6.81	11.20
3	4.36	10.42	11.20	10.81	7.19	5.1	8.65	9.30	8.98	9.03
2	2.86	12.10	13.52	12.81	5.19	3.6	10.20	11.05	10.63	7.38
1	1.36	17.43	16.40	16.92	1.09	2.1	15.30	12.50	13.90	4.10

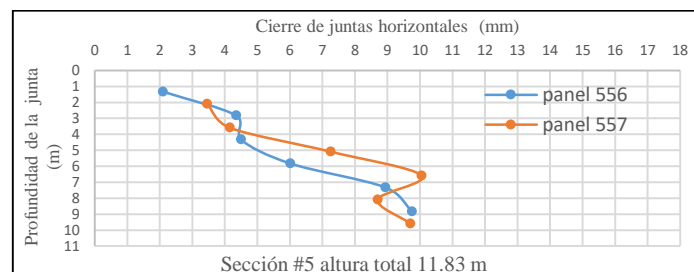
ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.



Sección No. 4										
Junta No.	z (m)	Columna No. 562				z (m)	Columna No. 563			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
7	10.36									
6	8.86	6.80	7.60	7.20	10.80	9.61	7.10	11.05	9.075	8.925
5	7.36	8.64	8.90	8.77	9.23	8.11	10.40	6.60	8.50	9.50
4	5.86	11.05	10.10	10.58	7.43	6.61	7.50	8.10	7.80	10.20
3	4.36	13.40	11.48	12.44	5.56	5.11	9.10	10.07	9.59	8.42
2	2.86	13.20	14.00	13.60	4.40	3.61	10.70	11.50	11.10	6.90
1	1.36	15.60	16.80	16.20	1.80	2.11	16.01	13.62	14.82	3.19

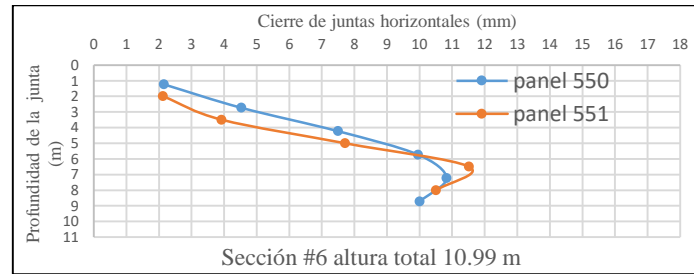


Sección No. 5										
Junta No.	z (m)	Columna No. 556				z (m)	Columna No. # 557			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
7										
6	8.82	8.80	7.70	8.25	9.75	9.58	9.20	7.40	8.3	9.7
5	7.32	8.50	9.63	9.07	8.94	8.08	10.60	8.00	9.30	8.70
4	5.82	10.79	13.19	11.99	6.01	6.58	7.30	8.60	7.95	10.05
3	4.32	13.80	13.20	13.50	4.50	5.08	11.30	10.20	10.75	7.25
2	2.82	14.10	13.20	13.65	4.35	3.58	14.10	13.60	13.85	4.15
1	1.32	16.20	15.60	15.90	2.10	2.08	14.30	14.80	14.55	3.45

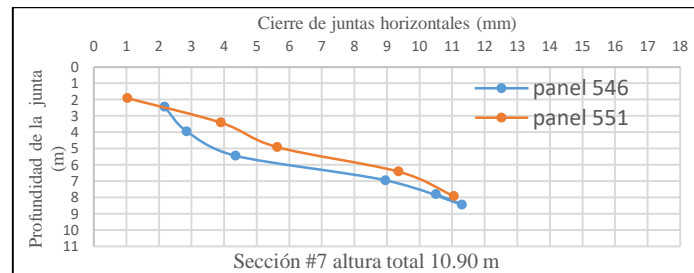


**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.**

Sección No. 6										
Junta No.	z (m)	Columna No. # 550				z (m)	Columna No.# 551			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
6	8.73	9.00	7.00	8.00	10.00	9.5				
5	7.23	8.10	6.25	7.18	10.83	8	6.00	9.00	7.5	10.5
4	5.73	7.80	8.30	8.05	9.95	6.5	7.00	5.96	6.48	11.52
3	4.23	9.50	11.50	10.50	7.50	5	9.45	11.12	10.29	7.72
2	2.73	14.50	12.45	13.48	4.53	3.5	16.10	12.05	14.08	3.93
1	1.23	15.80	15.90	15.85	2.15	2	14.16	17.60	15.88	2.12

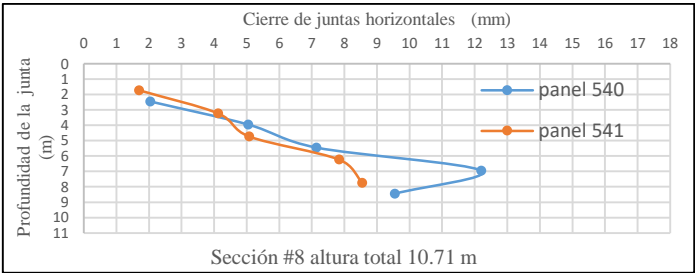


Sección No. 7										
Junta No.	z (m)	Columna No. 546				z (m)	Columna No. # 547			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
6	8.59	7.80	7.20	7.50	10.50	9.41				
5	7.09	6.90	6.50	6.70	11.30	7.91	9.00	4.90	6.95	11.05
4	5.59	8.80	9.30	9.05	8.95	6.41	9.00	8.30	8.65	9.35
3	4.09	13.20	14.10	13.65	4.35	4.91	11.43	13.30	12.37	5.64
2	2.59	14.30	16.00	15.15	2.85	3.41	14.20	14.00	14.10	3.90
1	1.09	16.20	15.46	15.83	2.17	1.91	17.74	16.20	16.97	1.03

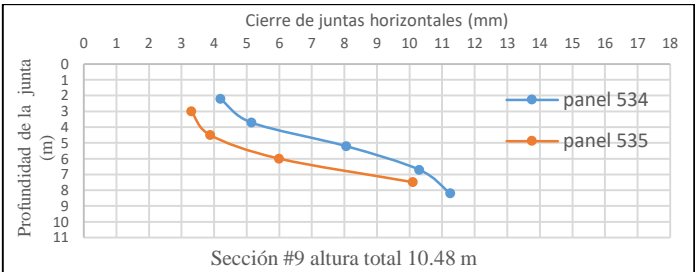


Sección No. 8										
Junta No.	z (m)	Columna No. 540				z (m)	Columna No. 541			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
6					18.00	9.23				
5	8.45	8.90	8.00	8.45	9.55	7.73	9.40	9.50	9.45	8.55
4	6.95	5.00	6.60	5.80	12.20	6.23	10.10	10.21	10.16	7.85
3	5.45	10.97	10.74	10.86	7.15	4.73	12.64	13.20	12.92	5.08
2	3.95	13.20	12.70	12.95	5.05	3.23	13.72	14.03	13.88	4.13
1	2.45	15.71	16.20	15.96	2.05	1.73	17.60	15.00	16.30	1.7

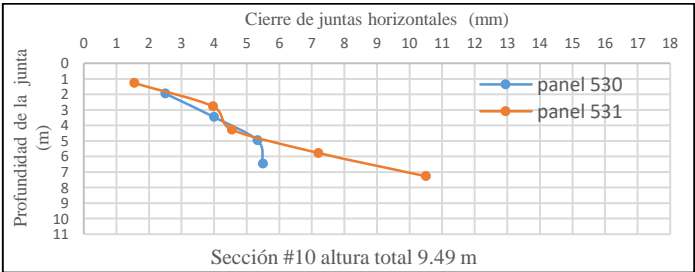
ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.



Sección No. 9										
Junta No.	z (m)	Columna No. 534				z (m)	Columna No. 535			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
5	8.21	5.90	7.60	6.75	11.25	9				18
4	6.71	6.00	9.40	7.70	10.30	7.5	8.80	7.00	7.9	10.1
3	5.21	9.78	10.10	9.94	8.06	6	11.40	12.61	12.01	6.00
2	3.71	12.50	13.20	12.85	5.15	4.5	13.60	14.64	14.12	3.88
1	2.21	13.20	14.40	13.80	4.20	3	14.30	15.10	14.70	3.30

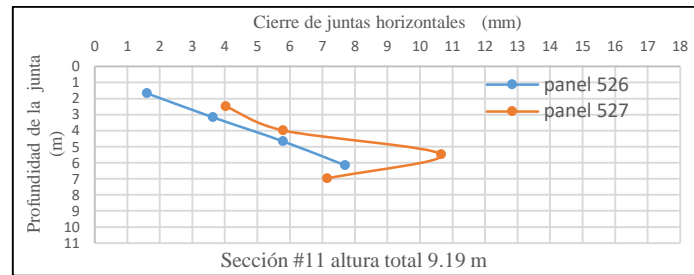


Sección No. 10										
Junta No.	z (m)	Columna No. 530				z (m)	Columnas No. 531			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
5	7.96					7.28	10	5.00	7.5	10.5
4	6.46	11.90	13.10	12.50	5.50	5.78	10.80	10.79	10.795	7.205
3	4.96	12.06	13.27	12.67	5.34	4.28	12.50	14.40	13.45	4.55
2	3.46	14.81	13.19	14.00	4.00	2.78	13.57	14.50	14.04	3.97
1	1.96	14.50	16.48	15.49	2.51	1.28	17.20	15.69	16.45	1.56

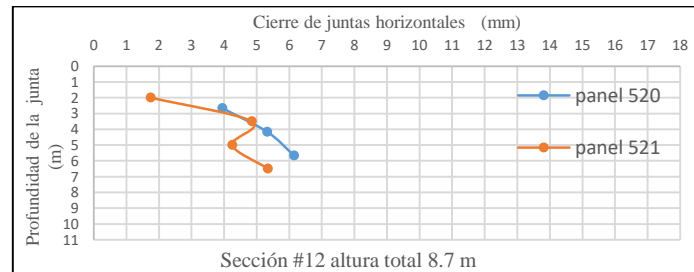


**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.**

Sección No. 11										
Junta No.	z (m)	Columna No. 526				z (m)	Columna No. 527			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
5	7.66									
4	6.16	10.60	10.00	10.30	7.70	6.98	10.50	11.20	10.85	7.15
3	4.66	12.02	12.40	12.21	5.79	5.48	9.50	5.20	7.35	10.65
2	3.16	13.44	15.30	14.37	3.63	3.98	12.62	11.80	12.21	5.79
1	1.66	16.80	16.00	16.40	1.60	2.48	14.08	13.87	13.98	4.03

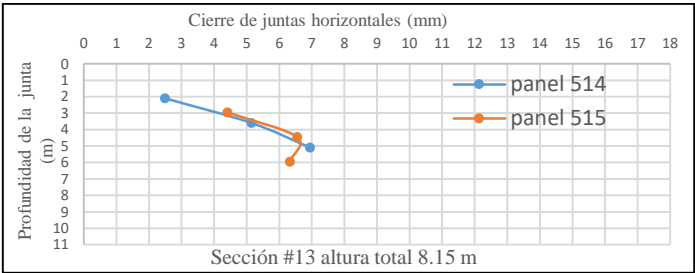


Sección No. 12										
Junta No.	z (m)	Columna No.520				z (m)	Columna No. 521			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	7.16					6.49	13.5	11.80	12.65	5.35
3	5.66	12.10	11.60	11.85	6.15	4.99	14.00	13.50	13.75	4.25
2	4.16	13.05	12.30	12.68	5.33	3.49	13.80	12.50	13.15	4.85
1	2.66	13.50	14.60	14.05	3.95	1.99	17.30	15.20	16.25	1.75

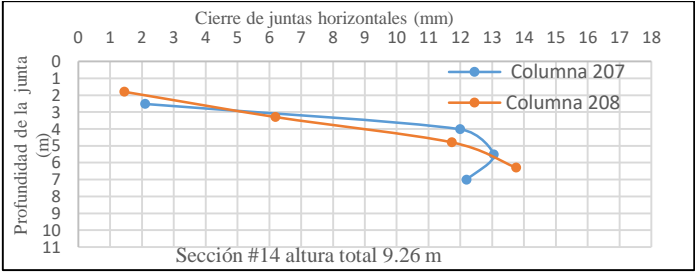


Sección No. 13										
Junta No.	z (m)	Columna No.# 514				z (m)	Columna No.# 515			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	6.6									
3	5.1	13.00	9.10	11.05	6.95	5.95	10.30	13.05	11.675	6.325
2	3.6	12.40	13.30	12.85	5.15	4.45	12.20	10.70	11.45	6.55
1	2.1	16.30	14.70	15.50	2.50	2.95	14.10	13.08	13.59	4.41

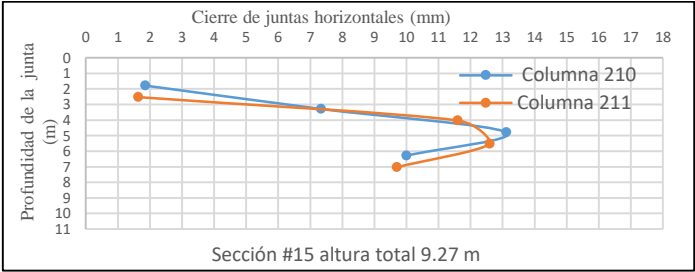
ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.



Sección No. 14										
Junta No.	z (m)	Columna No. 207				z (m)	Columna No. 208			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación media	Cierre
5						7.79				
4	7.01	6.00	5.60	5.80	12.20	6.29	3.30	5.20	4.25	13.75
3	5.51	4.60	5.30	4.95	13.05	4.79	6.30	6.24	6.27	11.73
2	4.01	5.01	7.00	6.01	12.00	3.29	11.40	12.20	11.80	6.20
1	2.51	15.60	16.20	15.90	2.10	1.79	17.20	15.90	16.55	1.45

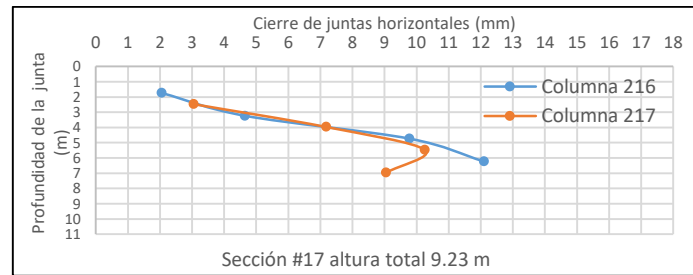


Sección No. 15										
Junta No.	z (m)	Columna No. 210				z (m)	Columna No. 211			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación media	Cierre
5	7.79									
4	6.29	8.20	7.80	8.00	10.00	7.02	8.10	8.50	8.30	9.70
3	4.79	4.37	5.40	4.89	13.12	5.52	6.40	4.40	5.40	12.60
2	3.29	11.27	10.06	10.67	7.34	4.02	6.00	6.80	6.40	11.60
1	1.79	16.40	15.90	16.15	1.85	2.52	17.94	14.80	16.37	1.63

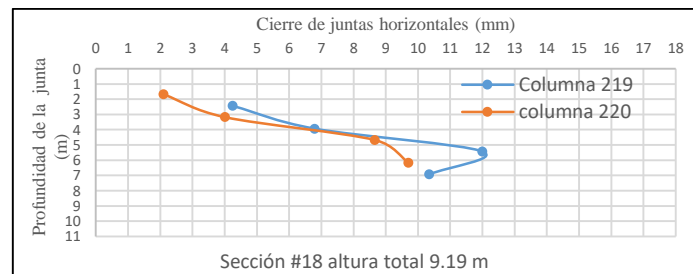


**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.**

Sección No. 16										
Junta No.	z (m)	Columna No. 213				z (m)	Columna No. 214			
		Separación (mm)					Separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación media	Cierre
5						7.75	-	-	-	
4	7.01	6.60	7.00	6.80	11.20	6.25	7.00	8.00	7.50	10.50
3	5.51	5.15	4.70	4.93	13.08	4.75	5.50	6.80	6.15	11.85
2	4.01	6.22	8.21	7.22	10.79	3.25	9.50	11.50	10.50	7.50
1	2.51	15.80	17.13	16.47	1.54	1.75	17.50	14.80	16.15	1.85

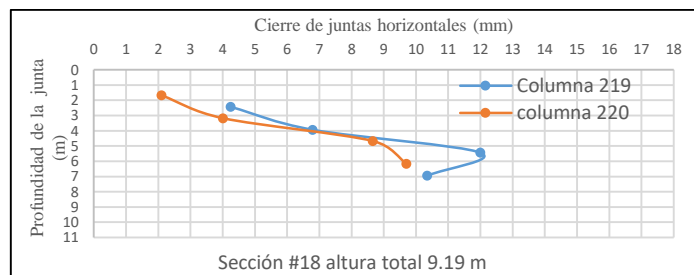


Sección No. 17										
Junta No.	z (m)	Columna No. 216				z (m)	Columna No. 217			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
5						8.47	-	-	-	
4	6.24	6.80	5.00	5.90	12.10	6.97	10.10	7.80	8.95	9.05
3	4.74	5.50	10.95	8.23	9.78	5.47	9.20	6.30	7.75	10.25
2	3.24	13.70	13.00	13.35	4.65	3.97	9.74	11.90	10.82	7.18
1	1.74	16.10	15.80	15.95	2.05	2.47	14.90	15.00	14.95	3.05

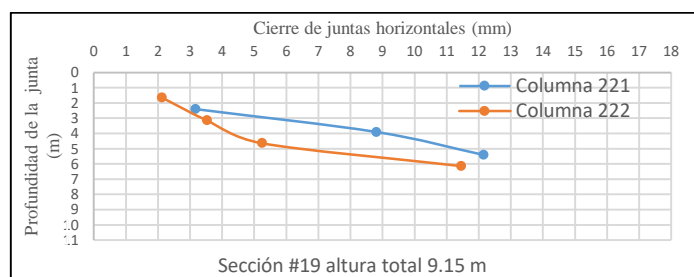


Sección No. 18										
Junta No.	z (m)	Columna No. 219				z (m)	Columna No. # 220			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
5						7.68	-	-	-	
4	6.94	9.00	6.30	7.65	10.35	6.18	8.00	8.60	8.30	9.70
3	5.44	5.90	6.10	6.00	12.00	4.68	8.31	10.37	9.34	8.66
2	3.94	10.09	12.32	11.21	6.80	3.18	14.12	13.87	14.00	4.01
1	2.44	13.40	14.10	13.75	4.25	1.68	17.00	14.80	15.90	2.10

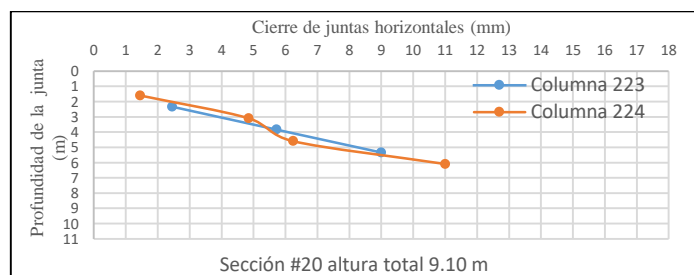
ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.



Sección No. 19										
Junta No.	z (m)	Columna No. # 221				z (m)	Columna No.# 222			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
5						7.64	-	-	-	
3	5.41	7.60	7.10	7.35	10.65	4.64	12.67	12.85	12.76	5.24
2.00	3.91	8.00	10.38	9.19	8.81	3.14	15.70	13.25	14.48	3.53
1.00	2.41	15.26	14.40	14.83	3.17	1.64	16.45	15.30	15.88	2.13

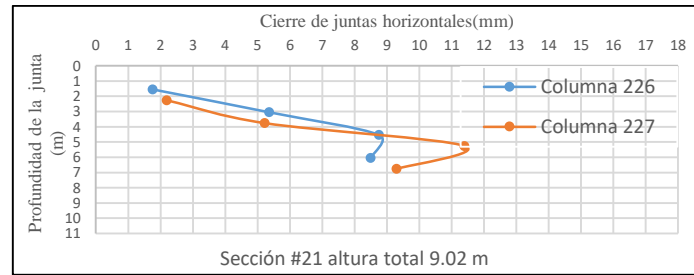


Sección No. 20										
Junta No.	z (m)	Columna No. 223				z (m)	Columna No.# 224			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	6.83					6.09	6.60	7.40	7.00	11.00
3	5.33	10.00	8.00	9.00	9.00	4.59	11.25	12.28	11.77	6.24
2	3.83	11.91	12.66	12.29	5.72	3.09	12.50	13.80	13.15	4.85
1	2.33	16.80	14.30	15.55	2.45	1.59	17.11	16.00	16.56	1.45

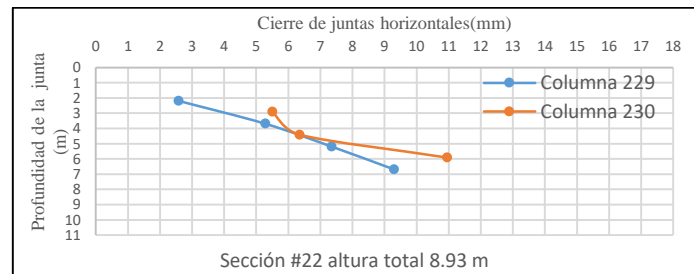


Sección No. 21										
Junta No.	z (m)	Columna No. 226				z (m)	Columna No. 227			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
5	7.54									
4	6.04	13.00	6.00	9.50	8.50	6.76	8.10	9.30	8.70	9.30
3	4.54	5.30	13.19	9.25	8.76	5.26	7.20	6.00	6.60	11.40
2	3.04	12.10	13.19	12.65	5.36	3.76	12.96	12.60	12.78	5.22
1	1.54	15.60	16.88	16.24	1.76	2.26	16.80	14.82	15.81	2.19

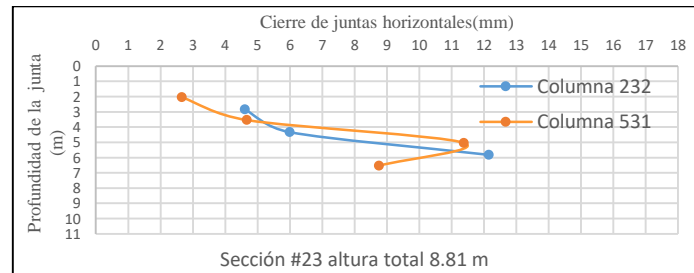
**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.**



Sección No. 22										
Junta No.	z (m)	Columna No. 229				z (m)	Columna No. 230			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	6.69	9.30	8.10	8.70	9.30	7.41	-	-	-	
3	5.19	10.20	11.10	10.65	7.35	5.91	7.00	7.10	7.05	10.95
2	3.69	11.94	13.50	12.72	5.28	4.41	11.50	11.80	11.65	6.35
1	2.19	15.75	15.10	15.43	2.58	2.91	14.10	10.90	12.50	5.50

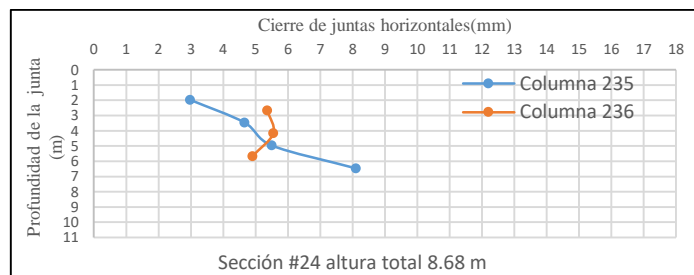


Sección No. 23										
Junta No.	z (m)	Columna No. 232				z (m)	Columnas No. 233			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	7.33					6.54	10.00	8.50	9.25	8.75
3	5.83	5.50	6.20	5.85	12.15	5.04	6.10	7.15	6.63	11.38
2	4.33	12.04	11.98	12.01	5.99	3.54	12.17	14.50	13.34	4.67
1	2.83	13.18	13.60	13.39	4.61	2.04	16.89	13.80	15.35	2.66

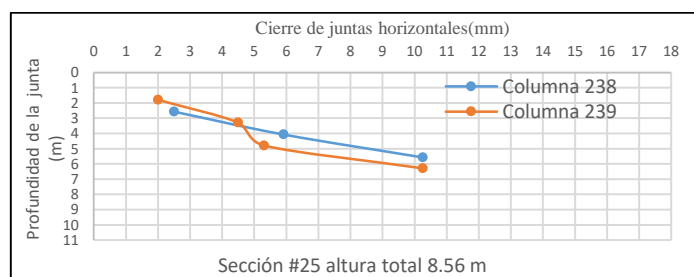


Sección No. 24										
Junta No.	z (m)	Columna No. 235				z (m)	Columna No. 236			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	6.46	9.80	10.00	9.90	8.10	7.16				
3	4.96	15.00	10.00	12.50	5.50	5.66	13.20	13.00	13.10	4.90
2	3.46	12.68	14.00	13.34	4.66	4.16	11.00	13.90	12.45	5.55
1	1.96	14.15	15.91	15.03	2.97	2.66	12.38	12.90	12.64	5.36

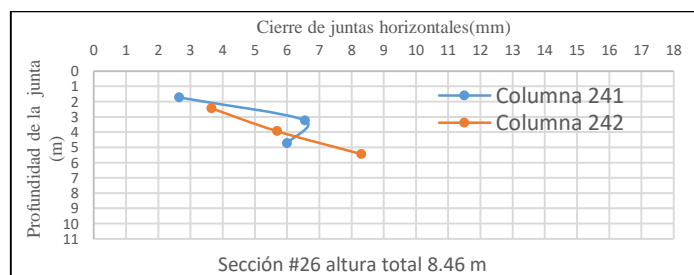
ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.



Sección No. 25										
Junta No.	z (m)	Columna No.238				z (m)	Columna No. 239			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	7.07					6.29	8.00	7.50	7.75	10.25
3	5.57	4.50	11.00	7.75	10.25	4.79	12.60	12.80	12.70	5.30
2	4.07	11.90	12.27	12.09	5.92	3.29	12.80	14.20	13.50	4.50
1	2.57	15.00	16.00	15.50	2.50	1.79	15.10	16.90	16.00	2.00

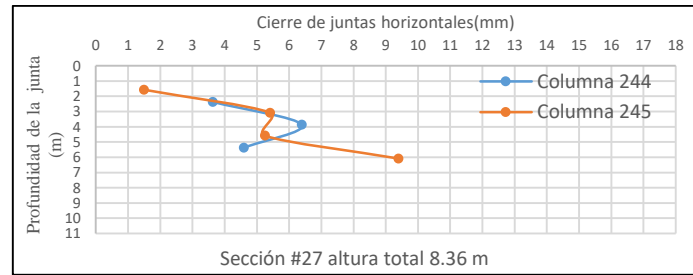


Sección No. 26										
Junta No.	z (m)	Columna No.# 241				z (m)	Columna No.# 242			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	6.23	9.40	9.00	9.20	8.80	6.94				
3	4.73	16.00	8.00	12.00	6.00	5.44	11.90	7.50	9.70	8.30
2	3.23	11.70	11.20	11.45	6.55	3.94	11.83	12.80	12.32	5.69
1	1.73	15.40	15.30	15.35	2.65	2.44	14.60	14.10	14.35	3.65

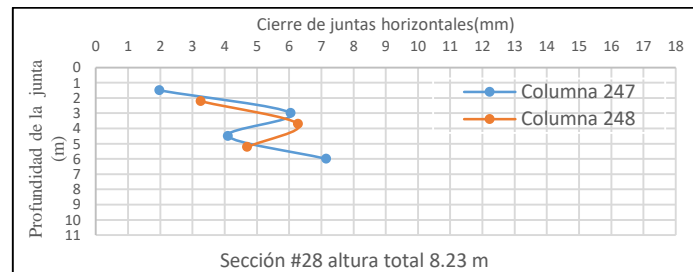


Sección No. 27										
Junta No.	z (m)	Columna No.# 244				z (m)	Columna No.# 245			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	6.87					6.08	9.00	8.20	8.60	9.40
3	5.37	13.60	13.20	13.40	4.60	4.58	12.20	13.30	12.75	5.25
2	3.87	10.71	12.50	11.61	6.40	3.08	12.80	12.37	12.59	5.42
1	2.37	14.36	14.38	14.37	3.63	1.58	16.12	16.88	16.50	1.50

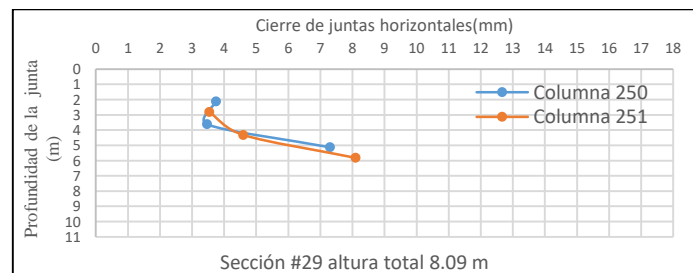
**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.**



Sección No. 28										
Junta No.	z (m)	Columna No.# 247				z (m)	Columna No.# 248			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	6.00	8.90	12.80	10.85	7.15	6.71				
3	4.50	13.40	14.40	13.90	4.10	5.21	13.60	13.00	13.30	4.70
2	3.00	12.10	11.80	11.95	6.05	3.71	11.30	12.14	11.72	6.28
1	1.50	16.26	15.80	16.03	1.97	2.21	16.50	13.00	14.75	3.25

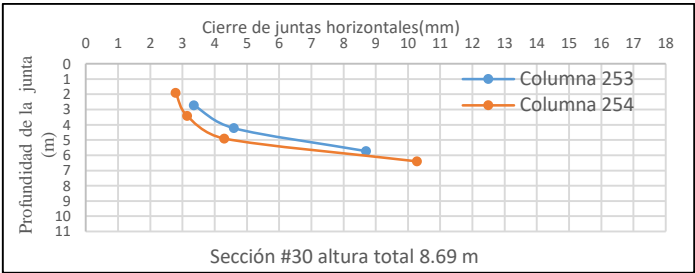


Sección No. 29										
Junta No.	z (m)	Columna No.# 250				z (m)	Columna No.# 251			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	6.62									
3	5.12	9.00	12.40	10.70	7.30	5.82	11.00	8.80	9.90	8.10
2	3.62	13.96	15.10	14.53	3.47	4.32	10.80	16.00	13.40	4.60
1	2.12	13.41	15.10	14.26	3.75	2.82	14.06	14.86	14.46	3.54

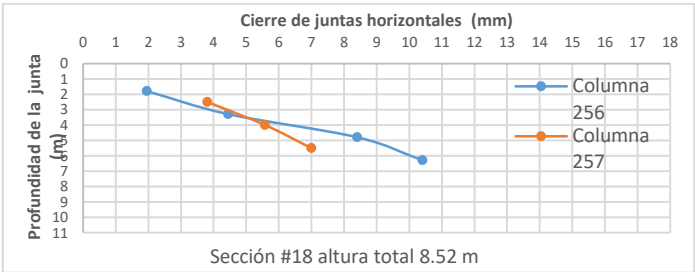


Sección No. 30										
Junta No.	z (m)	Columna No.# 253				z (m)	Columna No.# 254			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	7.22					6.41	6.00	9.44	7.72	10.28
3	5.72	9.00	9.60	9.30	8.70	4.91	16.00	11.40	13.70	4.30
2	4.22	14.50	12.30	13.40	4.60	3.41	15.51	14.20	14.86	3.15
1	2.72	16.80	12.50	14.65	3.35	1.91	13.52	16.90	15.21	2.79

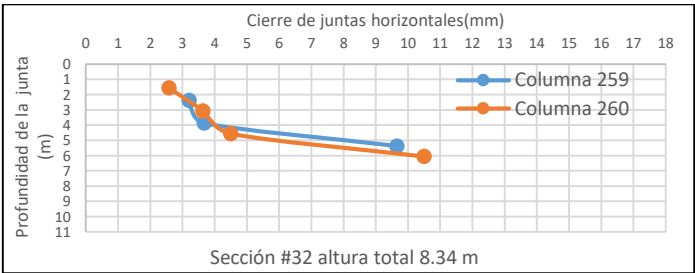
ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.



Sección No. 31										
Junta No.	z (m)	Columna No.# 256				z (m)	Columna No.# 257			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	6.30	6.20	9.00	7.60	10.40	7.00				
3	4.80	7.00	12.20	9.60	8.40	5.50	11.00	11.00	11.00	7.00
2	3.30	14.60	12.50	13.55	4.45	4.00	12.34	12.50	12.42	5.58
1	1.80	16.30	15.80	16.05	1.95	2.50	15.79	12.60	14.20	3.81



Sección No. 32										
Junta No.	z (m)	Columna No.# 259				z (m)	Columna No.# 260			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4	6.87					6.06	6.90	8.10	7.50	10.50
3	5.37	8.60	8.10	8.35	9.65	4.56	16.00	11.00	13.50	4.50
2	3.87	14.86	13.80	14.33	3.67	3.06	13.41	15.33	14.37	3.63
1	2.37	13.10	16.50	14.80	3.20	1.56	15.10	15.74	15.42	2.58



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CERRAMIENTO DE JUNTAS HORIZONTALES ENTRE
PANELES DE MUROS DE SUELO REFORZADO.**

Sección No. 33										
Junta No.	z (m)	Columna No.# 262				z (m)	Columna No.# 263			
		separación (mm)					separación (mm)			
		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre		Lateral Izquierdo	Lateral Derecho	Separación Media	Cierre
4						6.61				
3	5.93	8.10	7.06	7.58	10.42	5.11	12.80	15.10	13.95	4.05
2	4.43	13.80	13.90	13.85	4.15	3.61	13.90	14.10	14.00	4.00
1	2.93	15.08	13.05	14.07	3.94	2.11	16.15	15.36	15.76	2.25

